



Communication 19

Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe

Philippe Chèvre

- N° 10 2002 J. Dubois, M. Piroton
Génération et transfert des crues extrêmes - Le logiciel Faitou
- N° 11 2002 A. Lavelli, G. De Cesare, J.-L. Boillat
Modélisation des courants de turbidité dans le bassin Nord du Lac de Lugano
- N° 12 2002 P. de Almeida Manso
Stability of linings by concrete elements for surface protection of overflow earthfill dams
- N° 13 2002 E. Bollaert
Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact
- N° 14 2003 D. S. Hersberger
Wall roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel bed
- N° 15 2003 Ch. Oehy
Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents
- N° 16 2004 J.-L. Boillat, P. de Souza
Hydraulic System - Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge
- N° 17 2004 Cycle postgrade en aménagements hydrauliques
Collection des articles des travaux de diplôme postgrade
- N° 18 2004 Soleyman Emami
Erosion protection downstream of diversion tunnels using concrete prisms - Design criteria based on a systematic physical model study
- N° 19 2004 Philippe Chèvre
Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe

PREFACE

Les récents résultats des projets de recherche démontrent que les macro rugosités (rainures verticales) fixées aux murs des rives réduisent considérablement l'affouillement du lit dans les rivières. Cette même connaissance peut être appliquée aux rives aménagées le plus naturellement possible comme les enrochements ondulés.

Dans la présente communication, Monsieur Philippe Chèvre présente les résultats d'une étude systématique sur modèle physique, par laquelle il analyse l'influence d'une telle macro-rugosité sur le drainage et l'érosion en courbe. Monsieur Chèvre donne des informations utiles sur le comportement de l'écoulement et de l'érosion ainsi que des recommandations pour la conception. En plus de la variabilité de l'écoulement, un enrochement ondulé a un impact positif sur la morphologie du lit. Les conditions d'existence des espèces aquatiques s'en trouvent ainsi doublement améliorées.

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet de recherche « Rhône – Thur » avec le support financier de l'Office Fédéral des eaux et de la géologie.

Prof. Dr Anton Schleiss

VORWORT

Die Resultate neuerer Forschungsprojekte zeigen, dass an Ufermauern befestigte vertikale Makrorauhigkeiten (vertikale Rippen) die Kolke an der Aussenseite von Flusskurven erheblich reduzieren. Diese Erkenntnisse können auch auf naturnah gestaltete Ufer wie geschwungene, rauhe Blockwürfe mit Buchten angewandt werden.

In der vorliegenden Mitteilung beschreibt Herr Philippe Chèvre die Resultate systematischer, hydraulischer Modellversuche, mit welchen der Einfluss von geschwungenen Blockwürfen auf Erosion und Geschiebetransport in Flusskurven untersucht wurde. Herr Chèvre liefert wertvolle Informationen zum Strömungs- und Erosionsverhalten solch naturnaher Uferschutzmassnahmen, sowie Hinweise zu deren Gestaltung. Neben einer erhöhten Strömungsvielfalt führt ein geschwungener Blockwurf auch zu einer abwechslungsreicheren Sohlenmorphologie und somit zu verbesserten Lebensbedingungen für aquatische Lebewesen (Flora und Fauna)

Die Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "Rhone – Thur" mit der finanziellen Unterstützung des Bundesamtes für Wasser und Geologie durchgeführt.

Prof. Dr Anton Schleiss

Résumé

Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe

L'aménagement des cours d'eau a longtemps été considéré d'un point de vue fonctionnel exclusivement, en regard de la protection contre les crues. Les mesures d'aménagement se doivent aujourd'hui d'intégrer également les aspects environnementaux, sociétaux et économiques. Dans ce contexte, des essais sur modèle physique ont été réalisés pour déterminer l'influence géométrique d'un enrochement dans un écoulement en courbe. Deux géométries ont été testées, la première avec un talus à pente régulière comme situation de référence, la seconde avec un talus ondulé, dans l'optique d'améliorer les conditions hydro-morphologiques du cours d'eau. Les paramètres étudiés sont le débit d'écoulement, le charriage des sédiments, l'érosion du lit et la stabilité de l'enrochement. Sur la base des résultats expérimentaux et des observations de comportement de l'écoulement, des conclusions et recommandations sont faites dans la perspective d'une application pratique du nouveau type de géométrie de rive.

Abstract

Influence of the macro-roughness of a bank protection by rip-rap on bed load transport and local scouring in river bends

Fluvial hydraulic engineering was considered for a long time from a functional point of view exclusively, with regard to flood protection. Hydraulic-engineering measures must also integrate the environmental, social and economic aspects today. In this context, experiments on a physical model were carried out to determine the geometrical influence of a riprap in a curved flow. Two geometries were tested, the first with a bank with regular slope as reference situation, the second with an undulated bank, in optics to improve the hydro-morphological conditions of the river. The studied parameters are the flow discharge, the transport of the sediments, the scouring of the bed and the stability of the riprap. On the basis of experimental results and observations of the flow behavior, conclusions and recommendations are given in prospect for a practical application of the new type of bank geometry.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Contexte de l'étude	1
1.2 Objectif du travail	1
2. Revue bibliographique et bases théoriques	3
2.1 Détermination de la vitesse d'écoulement	5
2.2 Détermination du transport solide	7
2.2.1 Transport solide	7
2.2.2 Rupture du pavage	10
2.3 Dimensionnement des enrochements	10
2.4 Détermination de la profondeur d'érosion en courbe	11
3. Essais sur modèle physique	16
3.1 Description de l'installation expérimentale	16
3.1.1 Canal d'essai	16
3.1.2 Installation de mesure	17
3.2 Analyse pour la détermination de la granulométrie du lit	18
3.2.1 Granulométrie du lit	19
3.2.2 Granulométrie du talus	20
3.2.3 Pente du lit	21
3.3 Paramètres étudiés	21
3.3.1 Géométrie du talus	21
3.3.2 Débit d'écoulement	22
3.3.3 Transport solide	23
3.3.4 Erosion du lit	23
3.4 Procédure générale d'essai	25
3.4.1 Déroulement de l'essai physique	25
3.4.2 Traitement des résultats	27
3.5 Nomenclature utilisée pour les essais	27
4. Résultats des essais	29
4.1 Essais avec talus à pente constante	29
4.1.1 Essai 1 : talus à pente constante, $Q = 70$ l/s	33
4.1.2 Essai 2 : talus à pente constante, $Q = 85$ l/s	34
4.1.3 Essai 3 : talus à pente constante, $Q = 100$ l/s	34
4.2 Essais avec talus à pente variable	34
4.2.1 Essai 4 : talus à pente variable, $Q = 70$ l/s	38
4.2.2 Essai 5 : talus à pente variable, $Q = 85$ l/s	39
4.2.3 Essai 6 : talus à pente variable, $Q = 100$ l/s	39
4.2.4 Observations sur le comportement de l'écoulement sur talus ondulé	40

5. Analyse et comparaison des résultats d'essais	43
5.1 Niveau d'eau amont, comparaison entre mesure et calcul	43
5.2 Transport solide	44
5.2.1 Influence de la géométrie du talus, analyse qualitative	44
5.2.2 Influence de la géométrie du talus, analyse quantitative	46
5.3 Erosion en courbe	49
5.3.1 Influence de la géométrie du talus, analyse qualitative	49
5.3.2 Influence de la géométrie du talus, analyse quantitative	54
5.4 Stabilité de l'enrochement	57
5.4.1 Arrachage de blocs du talus ondulé, analyse qualitative	57
5.4.2 Arrachage de blocs du talus ondulé, analyse quantitative	57
6. Essais complémentaires avec un talus ondulé modifié	60
6.1 Proposition d'essais complémentaires	60
6.1.1 Deuxième variante de talus ondulé	60
6.1.2 Essais avec talus à ondulé modifié	62
6.1.3 Autres essais envisageables	70
7. Conclusions	71
 Notations	 73
Liste des figures	75
Références	78
Remerciements	79
Annexes	81

1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Ce travail de diplôme fait partie intégrante du programme de recherche "Rhône-Thur", constitué de quatre modules. Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) est en charge du quatrième module intitulé "Mesures d'aménagement des cours d'eau au service de la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie" (Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft).

Ce module se compose de quatre travaux de recherche. Trois font l'objet de thèses de doctorat, le quatrième constituant le présent travail de diplôme postgrade.

Une application pratique du résultat de ces études est prévue dans le cadre du projet de la 3e correction du Rhône.

L'aménagement des cours d'eau a longtemps été considéré uniquement d'un point de vue fonctionnel, en particulier celui de la protection contre les crues. Les mesures d'aménagement doivent à présent intégrer d'autres facteurs importants que sont l'environnement, la société et l'économie pour améliorer l'acceptabilité des projets.

Ces mandats de recherche visent à établir les bases permettant d'amener les projets de réaménagement de cours d'eau vers une meilleure synergie entre la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie.

Ce travail de diplôme fait suite aux recherches réalisées au LCH par Daniel Hersberger sur l'effet de macro-rugosités verticales sur des murs de protection sur le charriage et l'érosion locale dans un écoulement en courbe, dans le cadre de sa thèse de doctorat (Roughness effect of outside protection walls on flow and scouring in bends of sediment transporting mountain rivers).

L'étude a consisté à analyser cet effet pour des enrochements en utilisant comme macro-rugosités un talus avec pente variable, c'est-à-dire un pied ondulé de l'enrochement. Les essais ont été effectués sur la même installation que pour les recherches précédentes.

Mots clés définissant le travail de diplôme postgrade:

Écoulement en courbe, érosion, charriage, enrochements, pied de talus ondulé, macro-rugosité

1.2 Objectif du travail

Les recherches précédentes ont montré que les macro-rugosités verticales sur les murs de protection réduisent fortement l'érosion en courbe. Ce travail de diplôme a pour but de montrer l'influence de la macro-rugosité des ouvrages de protections de rive en enrochements sur le charriage de sédiments et l'érosion locale.

Pour cela, des essais sur modèle physique ont été réalisés dans un canal courbe. Deux configurations d'enrochement ont été modélisées. L'influence des paramètres suivants a été étudiée:

- La géométrie de l'enrochement (pente et sinuosité du pied de talus);
- Le débit d'écoulement Q .

La granulométrie des matériaux du lit a été choisie selon une courbe granulométrique étendue, semblable à celle des rivières naturelles.

La première configuration, un talus à pente constante, constitue l'état de référence. Une seconde configuration, plus proche d'un état naturel a ensuite été proposée, en variant autant que possible la pente de la berge et en donnant une sinuosité au pied de talus, ce qui produit une succession d'anses.

En tout, six essais ont été réalisés, pour des débits compris entre 70 et 100 l/s. Ils sont résumés dans la Figure 1. Les schémas d'installation pour les deux types de talus étudiés sont représentés dans les figures 2 et 3. Pour le cas avec pente de talus variable, la ligne de pied de talus a été délimitée par les pentes "extrêmes" 1:2 (limitation de l'emprise) et 4:5 (limite de stabilité). La longueur d'onde λ de la courbe de pied de talus a été choisie égale à la largeur du canal $L = 1$ m.

Ces géométries de talus ont un caractère très homogène pour permettre une comparaison entre les variantes expérimentales. Il faut souligner que l'application à un cas réel ne peut se faire selon une géométrie aussi régulière que sur l'installation d'essai, car son aspect serait trop artificiel, bien que déjà beaucoup plus naturel qu'un canal prismatique.

Débit [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé
70	Essai 1	Essai 4
85	Essai 2	Essai 5
100	Essai 3	Essai 6

Figure 1: Essais réalisés

La topographie du modèle a été relevée avant et après chaque essai pour déterminer l'érosion du fond. Pendant l'essai, le niveau d'eau de l'écoulement a été mesuré. L'introduction de sédiments à l'amont du modèle a été soumise à la contrainte de maintenir ce niveau constant à l'entrée du canal. Des échantillons de sédiments charriés ont été prélevés à la sortie du modèle, ainsi que des échantillons de la couche supérieure du lit.

A la fin des essais, un bilan du transport solide et de l'érosion relevée a été fait et utilisé pour la comparaison des deux configurations. La stabilité des enrochements a également été abordée.

Sur la base de l'analyse des résultats et des observations effectuées au cours des essais, des recommandations sont fournies en vue d'une application à un cas réel de la configuration avec un talus ondulé. Suite à ces recommandations, une deuxième variante de talus ondulé a également été testée.

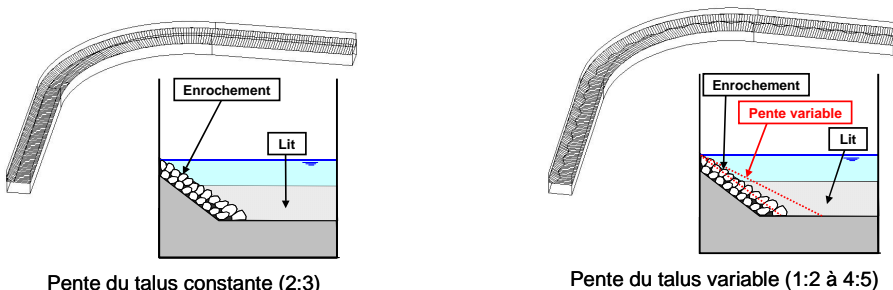


Figure 2: Configuration des essais

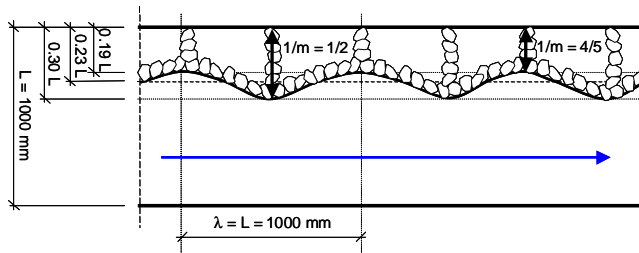


Figure 3: Ligne de pied de talus ondulée (longueur d'onde $\lambda = L$)

2. Revue bibliographique et bases théoriques

Cette étude nécessite principalement l'analyse des conditions d'écoulement et de rugosité, de transport de sédiments et de l'érosion en courbe. Les principales études sur ces sujets sont brièvement rappelées ci-dessous. Pour plus de détails et les références complètes, voir HERSBERGER (2002).

• Ecoulement et rugosité

La formule de base pour le calcul de la vitesse d'écoulement, tenant compte de la rugosité, est celle de Chézy (1768):

$$V = C \cdot \sqrt{R_h \cdot J}$$

Avec	V	[m/s]	: vitesse de l'écoulement
	C	[m ^{1/2} /s]	: coefficient de rugosité de Chézy
	R _h	[m]	: rayon hydraulique de l'écoulement
	J	[-]	: pente longitudinale

Différentes formules empiriques ont ensuite été proposées pour déterminer la valeur du coefficient C de Chézy. Le coefficient C est remplacé par une combinaison du rayon hydraulique R_h et d'un coefficient de rugosité (par exemple K_s pour Strickler, cf. 2.1).

La formule retenue (cf. 2.1) pour le calcul des conditions d'écoulement est la formule de Strickler (1923), qui remplace C par:

$$C = K_s \cdot R_h^{1/6}$$

Avec	C	[m ^{1/2} /s]	: coefficient de rugosité de Chézy
	K _s	[m ^{1/3} /s]	: coefficient de rugosité de Strickler
	R _h	[m]	: rayon hydraulique de l'écoulement

- **Transport solide**

Shields (1936) a mis en relation la "force appliquée par l'écoulement sur le grain" et la "résistance au mouvement du grain". Il en résulte un graphique (cf. Figure 5) qui permet de déterminer si le grain considéré est mis en mouvement ou non.

Meyer-Peter & Müller (1948) ont ensuite réalisés des tests en laboratoire pour des pentes entre 0.1 et 2.3%, qui ont permis de proposer une formule pour le calcul de la quantité de sédiments transportés. La formule contient un facteur K_0 pour tenir compte de la forme du lit, mais Meyer-Peter & Müller ne donnent pas de formule pour déterminer ce facteur K_0 .

SMART & JAEGGI (1983) ont complété les travaux de Meyer-Peter & Müller en variant les pentes testées entre 3 et 20%. La formule qui en résulte (cf. 2.2.1.2), ne contient plus de facteur de forme du lit, ce qui facilite son application.

- **Erosion en courbe**

Les formules de calcul de l'érosion en courbe sont basées sur l'équilibre des forces agissant sur un grain. Ces formules ont toutes la même structure (cf. 2.4):

$$h_s = h_m \cdot \left(\frac{R_i}{R_m} \right)^k \quad \text{où:} \quad \sin\beta = k \cdot \frac{h_s}{R_i}$$

avec	h_s	[m]	:	profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface d'eau
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	R_i	[m]	:	rayon local
	R_m	[m]	:	rayon moyen
	$\sin\beta$	[-]	:	pente transversale locale du lit
	k	[-]	:	facteur adimensionnel

Différentes recherches ont principalement porté sur la détermination du facteur k .

Les premières études sur ce sujet ont été menées par Fargue (1868).

La formule retenue pour la présente étude (cf. 2.4) est celle qui a été proposée par KIKKAWA ET AL. (1976).

D'autres études ont été menées par Van Bendegom (1947), Engelund (1974), Bridge (1976), Zimmermann (1983), Falcon & Kennedy (1983), Odgaard (1986), Bazilevich (1982), Peter (1986) et Reindl (1984). Il n'y a pas à ce jour d'étude connue sur l'érosion due la macro-rugosité d'un enrochement ondulé.

Pour l'analyse de ses essais avec des macro-rugosités verticales HERSBERGER (2002) a proposé une version modifiée de la formule de Bridge (1976).

2.1 Détermination de la vitesse d'écoulement

Il est nécessaire de connaître la vitesse d'écoulement pour les formules de transport ou d'érosion.

La vitesse ou le débit d'un écoulement peuvent être déterminés avec l'équation de Manning-Strickler:

$$V_m = K_s \cdot R_h^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (2.1)$$

ou avec $Q = V_m \cdot S \quad (2.2)$

$$Q = S \cdot K_s \cdot R_h^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (2.3)$$

où $R_h = \frac{S}{P} \quad (2.4)$

avec	V_m	[m/s]	:	vitesse moyenne de l'écoulement
	K_s	[m ^{1/3} /s]	:	coefficient de rugosité de Strickler
	R_h	[m]	:	rayon hydraulique de l'écoulement
	J	[-]	:	pente longitudinale
	Q	[m ³ /s]	:	débit de l'écoulement
	S	[m ²]	:	section de l'écoulement
	P	[m]	:	périmètre mouillé de l'écoulement

La vitesse est influencée par des paramètres géométriques, mais aussi par la rugosité des différents éléments du périmètre mouillé. La rugosité peut être exprimée en fonction de la granulométrie de chaque partie du périmètre mouillé:

$$K_s = \frac{21.1}{d_m^{1/6}} \quad (2.5)$$

ou $K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (2.6)$

avec	K_s	[m ^{1/3} /s]	:	coefficient de rugosité de Strickler
	d_m	[m]	:	diamètre moyen des sédiments
	d_{90}	[m]	:	diamètre égal à celui de 90% des sédiments

La formule 2.5 concerne le cas d'un lit naturel, alors que la formule 2.6 s'applique au cas d'un lit plat.

Pour un lit composé de N éléments de rugosités différentes, un coefficient de rugosité composé peut être calculé avec:

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_N \cdot n_N)}{P} \right]^{2/3} \quad (2.7)$$

où $K_s = \frac{1}{n} \quad (2.8)$

avec K_s $[m^{1/3}/s]$: coefficient de rugosité de Strickler
 n $[s/m^{1/3}]$: coefficient de rugosité de Manning
 P $[m]$: périmètre mouillé de l'écoulement

La section type modélisée dans cette étude est composée de trois éléments représentés sur la Figure 4:

1. Talus en enrochement;
2. Lit de sédiments;
3. Paroi intérieure lisse.

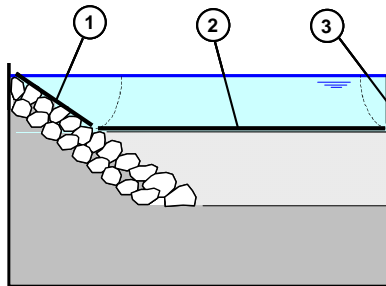


Figure 4: Périmètre mouillé de la section type modélisée

Le talus en enrochement est considéré comme une couche de pavage. Sa rugosité est calculée avec la formule 2.6.

La rugosité du lit peut être calculée avec les formules 2.5 ou 2.6.

La valeur de la rugosité de la paroi lisse en PVC est admise à $K_s = 100 \text{ m}^{1/3}/s$.

2.2 Détermination du transport solide

Le transport solide est fonction d'une part de la granulométrie des sédiments considérés et d'autre part des caractéristiques de l'écoulement tels que la pente longitudinale, la hauteur d'eau ou encore le rayon hydraulique.

Plusieurs aspects sont à prendre en compte pour déterminer la quantité de sédiments charriés:

- Quel diamètre de granulat l'écoulement est-il capable de déplacer?
- Quelle quantité de ce granulat l'écoulement est-il capable de déplacer?
- S'il y a une couche de pavage, à partir de quelle hauteur d'eau est-elle rompue?

Ces différentes questions sont abordées dans les paragraphes 2.2.1 et 2.2.2.

2.2.1 Transport solide

2.2.1.1 Diagramme adimensionnel de Shields-Yalin

Le diagramme adimensionnel de Shields-Yalin permet de déterminer, pour un écoulement aux caractéristiques géométriques et hydrauliques connues, si un granulat donné se met en mouvement ou non (cf. Figure 5).

Inversement, on peut définir quel est le diamètre maximal des granulats mobilisables par cet écoulement. Le diagramme adimensionnel de Shields-Yalin met en relation deux valeurs adimensionnelles τ_* (contrainte de cisaillement adimensionnelle) et d_* (diamètre de granulat adimensionnel), toutes deux fonction du diamètre moyen des grains d_m . La courbe qui traverse le graphique définit pour un d_* donné la valeur limite de τ_* à partir de laquelle le granulat considéré se met en mouvement. Cette valeur est appelée contrainte de cisaillement adimensionnelle critique et est notée τ_{*cr} .

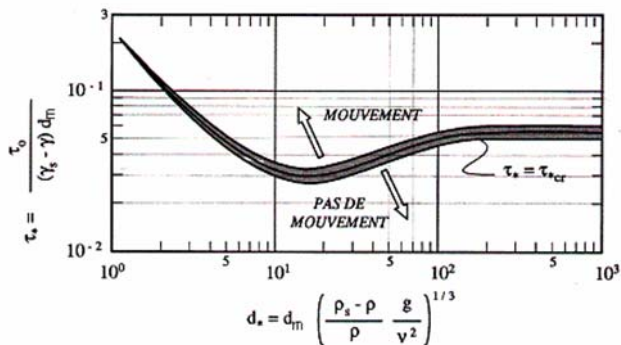


Figure 5: Diagramme adimensionnel de Shields-Yalin (GRAF & ALTINAKAR 1993)

Ces paramètres adimensionnels sont définis par les relations suivantes:

$$d_* = d_m \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{v^2} \right)^{1/3} \quad (2.9)$$

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_m} \quad (2.10)$$

où $\gamma = \rho \cdot g$ (2.11)

$$\tau_0 = J \cdot \gamma \cdot R_h \quad (2.12)$$

Dans la formule (2.9), on peut faire la substitution suivante:

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho} = s - 1 \quad (2.12)$$

avec	d_*	[-]	:	diamètre de granulat adimensionnel
	τ_*	[-]	:	contrainte de cisaillement adimensionnelle (facteur de Shields)
	ρ_s	[kg/m ³]	:	masse volumique des granulats
	ρ	[kg/m ³]	:	masse volumique de l'eau
	g	[m/s ²]	:	accélération terrestre
	v	[m ² /s]	:	viscosité cinématique de l'eau
	τ_0	[N/m ²]	:	contrainte de cisaillement
	γ_s	[N/m ³]	:	poids volumique des granulats
	γ	[N/m ³]	:	poids volumique de l'eau
	J	[-]	:	pente longitudinale
	R_h	[m]	:	rayon hydraulique de l'écoulement
	s	[-]	:	densité relative des sédiments ($s = \rho_s / \rho$)

Ce diagramme peut être utilisé de trois façons:

1. Pour une situation où la granulométrie et les conditions hydrauliques sont établies, on détermine les valeurs d_* et τ_* . On reporte ensuite ces valeurs sur le diagramme et on voit immédiatement s'il y a mouvement ou non;
2. On peut, pour une granulométrie donnée, calculer d_* , puis chercher sur le diagramme la valeur τ_{*cr} qui se trouve à la limite de la mise en mouvement. On en déduit ensuite τ_{0cr} et finalement les conditions hydrauliques (J , R_h) correspondantes;
3. On peut également faire la démarche inverse, c'est-à-dire rechercher pour des conditions hydrauliques données la taille du granulat qui sera mis en mouvement. Toutefois, cette opération est un peu plus compliquée, car le diamètre de granulat

d_m est utilisé dans la définition des deux valeurs d_* et τ_{*cr} . Cette démarche nécessite donc une approche itérative.

La détermination de la valeur de τ_{*cr} n'est pas seulement utile pour savoir s'il y a mouvement ou pas des sédiments. Elle sert également au calcul de la capacité de transport solide de l'écoulement, par exemple dans la formule de SMART & JAEGLI (1983), présentée au paragraphe 2.2.1.2.

2.2.1.2 Calcul de la capacité de transport solide

Les paramètres utilisés pour le calcul de la capacité de transport sont la granulométrie des sédiments et les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement.

Pour ce calcul, on peut utiliser par exemple la formule de SMART & JAEGLI (1983):

$$q_s = \frac{4}{(s-1)} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \cdot q \cdot J^{1.6} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{*cr} \cdot (s-1) \cdot d_m}{h_m \cdot J} \right) \quad (2.13)$$

avec	q_s	[m ² /s]	: débit solide par mètre de largeur
	s	[-]	: densité relative des sédiments du lit ($s = \rho_s / \rho$)
	d_{90}	[m]	: diamètre égal à celui de 90% des sédiments du lit
	d_{30}	[m]	: diamètre égal à celui de 30% des sédiments du lit
	q	[m ² /s]	: débit liquide par mètre de largeur
	J	[-]	: pente longitudinale
	τ_{*cr}	[-]	: contrainte de cisaillement adimensionnelle critique
	d_m	[m]	: diamètre moyen des sédiments du lit
	h_m	[m]	: hauteur d'eau moyenne

La valeur de la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique τ_{*cr} est extraite du diagramme de Shields-Yalin.

Une version simplifiée de cette formule est également proposée par SMART & JAEGLI (1983) pour l'application pratique:

$$q_s = 2.5 \cdot q \cdot J^{0.6} \cdot \left(J - \frac{d_m}{12.1 \cdot h_m} \right) \quad (2.14)$$

où les hypothèses simplificatrices sont:

- $\tau_{*cr} = 0.05$ ($d_* > 100$)
- $(d_{90} / d_{30})^{0.2} = 1.05$ (granulométrie peu étendue)
- $s = 2.68$

2.2.2 Rupture du pavage

Les formules de transport solide (cf. 2.2.1) nous indiquent si un granulat de diamètre donné sera ou non déplacé par l'écoulement et en quelle quantité. Cela suppose que rien ne s'oppose à ce déplacement.

Cela n'est pas le cas si l'on est en présence d'une couche de pavage. Celle-ci, formée de la partie la plus grossière de la granulométrie du lit, a une cohésion qui apporte une sorte d'effet de seuil:

- En-dessous d'une certaine valeur de débit ou de hauteur d'eau, aucun mouvement n'est possible, même si les formules de calcul du charriage donnent une capacité de transport solide positive;
- En-dessus de ce seuil, la couche de pavage est rompue, le lit est mobilisé et la capacité de transport solide est progressivement atteinte.

Ce paramètre ne fait pas partie des éléments étudiés ici. Mais il est nécessaire de le prendre en considération dans le choix de la granulométrie du lit, car avec une hauteur d'eau limitée (par la hauteur du talus), il faut s'assurer que le pavage soit bien détruit lors des expérimentations sur le modèle physique, sinon il n'y aurait ni transport solide ni érosion à observer.

La hauteur d'eau rompant la couche de pavage peut être calculée selon GÜNTER (1971), dont la version suivante est donnée par SCHLEISS (2001):

$$h_D = \frac{0.05 \cdot (s-1) \cdot d_m}{J} \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m} \right)^{2/3} \quad (2.15)$$

avec	h_D	[m]	:	hauteur d'eau à la rupture du pavage
	s	[-]	:	densité relative des sédiments du lit ($s = \rho_s / \rho$)
	d_m	[m]	:	diamètre moyen des sédiments du lit
	J	[-]	:	pente longitudinale
	d_{mD}	[m]	:	diamètre caractéristique des grains du pavage, admis égal
à d_{90}	d_{90}	[m]	:	diamètre égal à celui de 90% des sédiments du lit

2.3 Dimensionnement des enrochements

La démarche de STEVENS ET AL. (1976) pour dimensionner les enrochements par pose de gros blocs est utilisée.

Calculer tout d'abord le coefficient adimensionnel η qui est égal au rapport de la contrainte de cisaillement existant θ et la contrainte de cisaillement critique θ_{cr} :

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h_B \cdot J}{(s-1) \cdot d_B \cdot \theta_{cr}} \quad (2.16)$$

Avec un facteur 0.77, on considère que la contrainte de cisaillement est plus petite au pied de l'enrochement qu'au milieu de la rivière.

La sécurité de l'enrochement est déterminée ensuite avec:

$$\xi = \eta \cdot \frac{S_m}{\cos \alpha} \quad (2.17)$$

où
$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (2.18)$$

$$FS = \frac{S_m}{2} \cdot \left(\sqrt{\xi^2 + 4} - \xi \right) \quad (2.19)$$

avec	η	[-]	: facteur adimensionnel
	θ	[-]	: contrainte de cisaillement adimensionnelle
	θ_{cr}	[-]	: contrainte de cisaillement adimensionnelle critique
	h_B	[m]	: hauteur d'eau au-dessus des blocs (pied de talus)
	J	[-]	: pente longitudinale
	s	[-]	: densité relative des sédiments du lit ($s = \rho_s / \rho$)
	d_B	[m]	: diamètre des blocs d'enrochement
	ξ	[-]	: facteur adimensionnel
	α	[°]	: angle de talus ($\tan \alpha = 1/m$)
écoulement	φ	[°]	: angle d'équilibre du talus de l'enrochement, sans
	S_m	[-]	: facteur adimensionnel
	FS	[-]	: facteur de sécurité, typiquement 1.3 pour la crue de dimensionnement et 1.0 pour la crue extrême

Le dimensionnement est itératif:

1. Choix d'un diamètre de bloc d_B ;
2. Calcul de la rugosité du talus, puis de la rugosité de la section complète (cf. 2.1);
3. Calcul de la hauteur d'eau h_B (cf. 2.1);
4. Calcul du facteur de sécurité FS , selon la procédure décrite ci-dessus. Si le résultat est satisfaisant, le dimensionnement est terminé. Sinon retour au point 1 et choix d'un nouveau diamètre de bloc d'enrochement d_B .

2.4 Détermination de la profondeur d'érosion en courbe

Le principe d'un écoulement en courbe est décrit dans la Figure 6. La force centrifuge provoque une surélévation du niveau d'eau à l'extérieur de la courbe. Cela induit un mouvement de rééquilibrage des niveaux qui se traduit par un écoulement secondaire perpendiculaire à l'axe d'écoulement principal. La partie droite de la Figure 6 montre

comment cet écoulement secondaire provoque une érosion du lit dans la partie extérieure de la courbe et un dépôt dans sa partie intérieure.

Cet écoulement secondaire fait apparaître un tri des sédiments: les plus grossiers sont charriés du côté extérieur, les plus fins du côté intérieur.

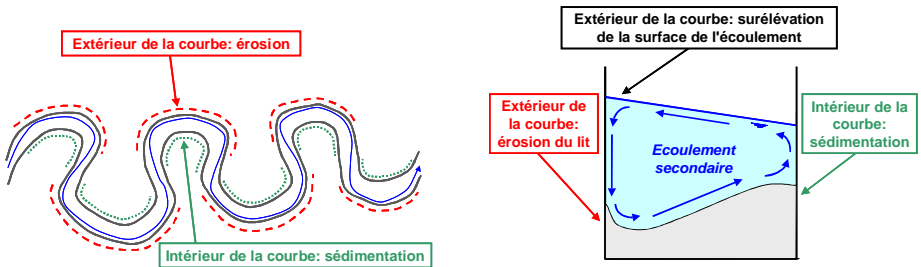


Figure 6: Schémas en plan et en coupe d'un écoulement en courbe

La plupart des formules de calcul de la profondeur maximale d'érosion en courbe ont la structure suivante:

$$h_s = h_m \cdot \left(\frac{R_i}{R_m} \right)^k \quad (2.20)$$

où le facteur k est donné par une formule de type:

$$\sin \beta = k \cdot \frac{h_s}{R_i} \quad (2.21)$$

avec	h_s	[m]	:	profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface d'eau
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	R_i	[m]	:	rayon local
	R_m	[m]	:	rayon moyen
	$\sin \beta$	[-]	:	pente transversale locale du lit
	k	[-]	.	facteur adimensionnel

Les paramètres de ces formules sont indiqués dans la Figure 7.

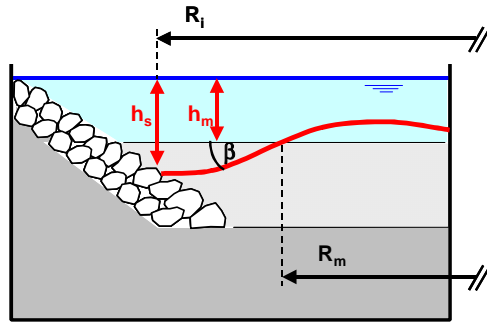


Figure 7: Paramètres des formules de calcul de la profondeur d'érosion

La valeur du facteur k (formules 2.20 et 2.21) est donnée par PETER (1986), sur la base de la formulation de KIKKAWA ET AL. (1976), de la façon suivante:

$$k = (2.575 \cdot c - 4.078) \cdot \sqrt{\theta} \quad (2.22)$$

où

$$\theta = \frac{h_m \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} \quad (2.23)$$

$$c = \frac{V_m}{V_*} \quad (2.24)$$

$$V_* = \sqrt{g \cdot h_m \cdot J} \quad (2.25)$$

avec Shields)	θ	[-]	:	contrainte de cisaillement adimensionnelle (facteur de
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	J	[-]	:	pente longitudinale
	s	[-]	:	densité relative des sédiments du lit ($s = \rho_s / \rho$)
	d_m	[m]	:	diamètre moyen des sédiments du lit
	c	[-]	:	facteur adimensionnel
	V_m	[m/s]	:	vitesse moyenne de l'écoulement
	V_*	[m/s]	:	vitesse de cisaillement
	g	[m/s ²]	:	accélération terrestre (9.81)

HERSBERGER (2002) donne une interprétation légèrement différente de la formulation de KIKKAWA ET AL. (1976). La formule 2.20 devient alors:

$$h_s = h_m \cdot \exp\left(\frac{A}{2} \cdot \left(\frac{R_i^2}{R_m^2} - 1\right)\right) \quad (2.26)$$

où

$$A = \left(1.8955 - 3.0023 \cdot \frac{V_*}{V_m}\right) \cdot Fr_d \quad (2.27)$$

$$Fr_d = \frac{V_m}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_m}} \quad (2.28)$$

avec	h_s	[m]	:	profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface d'eau
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	A	[-]	:	facteur adimensionnel
	R_i	[m]	:	rayon local
	R_m	[m]	:	rayon moyen
	V_m	[m/s]	:	vitesse moyenne de l'écoulement
	V_*	[m/s]	:	vitesse de cisaillement
	Fr_d	[-]	:	nombre de Froude densimétrique
	s	[-]	:	densité relative des sédiments du lit ($s = \rho_s / \rho$)
	g	[m/s ²]	:	accélération terrestre (9.81)
	d_m	[m]	:	diamètre moyen des sédiments du lit

Suite à ses essais sur modèle physique, HERSBERGER (2002) propose la formule suivante, basée sur la formulation de Bridge, pour déterminer l'érosion maximale en courbe, dans un canal à parois verticales:

$$\sin\beta = 0.394 \cdot \left(11 - 23 \cdot \frac{h_m}{B}\right) \cdot \frac{R_m}{B} \cdot \tan\phi \cdot \frac{h_s}{R_i} \quad (2.29)$$

Autrement dit, le facteur k (formules 2.20 et 2.21) devient

$$k = 0.394 \cdot \left(11 - 23 \cdot \frac{h_m}{B}\right) \cdot \frac{R_m}{B} \cdot \tan\phi \quad (2.30)$$

avec	k	[-]	:	facteur adimensionnel
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	B	[m]	:	largeur du miroir
	R_m	[m]	:	rayon moyen
	ϕ	[°]	:	angle de frottement des sédiments du lit

Toujours selon HERSBERGER (2002), pour le cas avec des macro-rugosités sur le mur extérieur (nervures), la formule 2.20 devient:

$$\frac{h_s}{h_m} = 7.7 \cdot \frac{e_s}{R_h} \cdot Fr \cdot (0.001 + (\theta - \theta_{cr})^2) + 1.7 \quad (2.31)$$

où
$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g \cdot h_m}} \quad (2.32)$$

$$R_h = \frac{S}{P} \quad (2.33)$$

avec	h_s	[m]	:	profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface d'eau
	h_m	[m]	:	profondeur d'eau moyenne
	e_s	[° ou m]	:	espacement des rugosités
	R_h	[m]	:	rayon hydraulique de l'écoulement
	Fr	[-]	:	nombre de Froude de l'écoulement
	θ	[-]	:	contrainte de cisaillement adimensionnelle (facteur de Shields)
	θ_{cr}	[-]	:	contrainte de cisaillement adimensionnelle critique
	V_m	[m/s]	:	vitesse moyenne de l'écoulement
	g	[m/s ²]	:	accélération terrestre (9.81)
	S	[m ²]	:	surface de l'écoulement
	P	[m]	:	périmètre mouillé de l'écoulement

3. Essais sur modèle physique

Le canal d'essais a déjà été utilisé pour les essais sur les macro-rugosités verticales réalisés par HERSBERGER (2002).

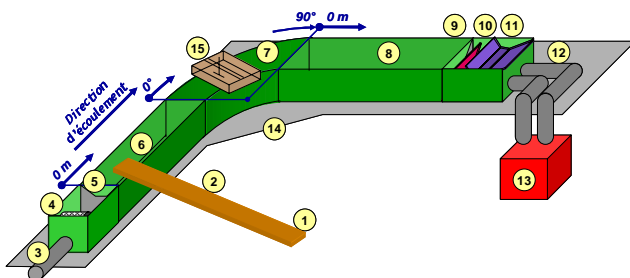
La différence principale est que le dispositif d'alimentation automatique de sédiments n'a pas pu être utilisé ici en raison d'une granulométrie trop fine. Une autre différence était la modification des seuils amont et aval imposée par la géométrie des enrochements.

3.1 Description de l'installation expérimentale

3.1.1 Canal d'essai

3.1.1.1 Géométrie du canal

Le canal d'essai est décrit dans le schéma de la Figure 8. Sa longueur totale est de près de 23 m, avec une courbe à 90° de rayon $R = 6$ m (à l'axe), encadrée par deux tronçons rectilignes de 6 et 7.5 m de longueur. Sa largeur est de $B = 1$ m.



- | | |
|---|--|
| 1 Alimentation manuelle en sédiments | 9 Seuil aval |
| 2 Tapis roulant (10 m) | 10 Clapet permettant remplissage et vidange lents du canal |
| 3 Conduite d'alimentation en eau | 11 Dispositif d'échantillonnage de sédiments |
| 4 Tube perforé (répartiteur de débit) | 12 Conduite de restitution |
| 5 Seuil amont | 13 Bac filtrant (récupération des sédiments) |
| 6 Tronçon rectiligne amont (7.5 m) | 14 Plateforme de travail |
| 7 Courbe (rayon à l'axe = 6 m, ouverture = 90°) | 15 Cadre de mesure |
| 8 Tronçon rectiligne aval (6 m) | |

Figure 8: Installation d'essai (schéma repris partiellement de HERSBERGER 2002)

Une pompe à débit variable permet d'assurer une alimentation en eau jusqu'à 250 l/s.

Un cadre de mesure équipé de 3 capteurs à ultrasons, montés sur un dispositif mobile, permet de faire des mesures de niveau. Les capteurs peuvent être déplacés systématiquement pour que les mesures couvrent toute la zone délimitée par le cadre. Celui-ci a huit positions standards qui permettent d'englober toute la région de la partie courbe du canal. Les zones hors de portée du cadre sont relevées manuellement.

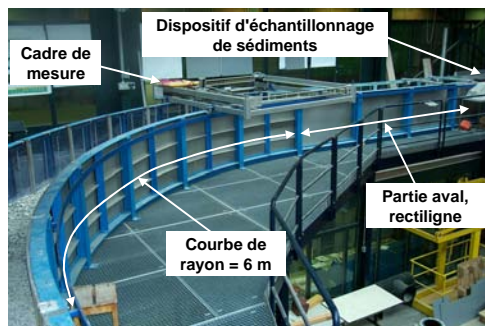


Figure 9: Vue partielle de l'installation

La Figure 9 montre les tronçons en courbe et aval de l'installation ainsi que le cadre de mesure.

La pente longitudinale est traitée au paragraphe 3.2.3. Quant à la géométrie de la section (profil en travers), elle est abordée au paragraphe 3.3.1.

3.1.1.2 Alimentation / récupération des sédiments

Les sédiments sont introduits manuellement à l'amont du canal (cf. Figure 8, points 1 et 2) et récupérés dans un bac filtrant à sa sortie (cf. Figure 8, point 13). Un dispositif d'échantillonnage permet d'effectuer des prélèvements de sédiments à la sortie du canal (cf. Figure 8, point 11).

La taille des grilles utilisées pour l'échantillonnage et dans les bacs de récupération a une influence sur le choix de la granulométrie des sédiments du lit (cf. 3.2.1).

Le dispositif d'alimentation automatique de sédiments (cf. HERSBERGER 2002) n'a pas pu être utilisé ici en raison d'une granulométrie trop fine.

3.1.2 Installation de mesure

3.1.2.1 Mesures de niveau

Différentes mesures de niveau ont été réalisées au cours des essais:

1. Mesure du niveau d'eau pendant l'essai et de la topographie du lit après l'essai avec les capteurs à ultrasons;
2. Mesure manuelle du niveau du lit avant et après l'essai dans les zones hors de portée du cadre de mesure;
3. Mesure manuelle du niveau d'eau amont pendant l'essai pour contrôler sa stabilité;
4. Mesure manuelle de contrôle du niveau du lit au centre de la courbe (45°) pendant l'essai.

3.1.2.2 Echantillonnage des sédiments

Des échantillons de sédiments ont été prélevés pendant et après les essais:

1. Echantillons prélevés pendant l'essai à la sortie du canal (cf. Figure 8, point 11), puis pesés pour établir un bilan des sédiments (cf. 5.2.2 et A5.1). Une analyse

granulométrique a été réalisée pour le dernier échantillon de chaque essai (cf. A6.1);

2. Echantillons de la couche supérieure du lit, au centre de la courbe, prélevés à l'intérieur et à l'extérieur de la section, à la fin de chaque série d'essais. Une analyse granulométrique a été réalisée pour ces échantillons (cf. A6.5).

3.2 Analyse pour la détermination de la granulométrie du lit

La Figure 10 présente le schéma général du calcul amenant au choix des granulométries du lit et du talus utilisées pour le modèle physique. Ce processus est itératif, car ces granulométries ont une influence sur l'écoulement (hauteur d'eau, vitesse, cf. 2.1), au travers de la rugosité qu'elles provoquent. Les résultats de ces calculs sont donnés en annexe (cf. A.1).

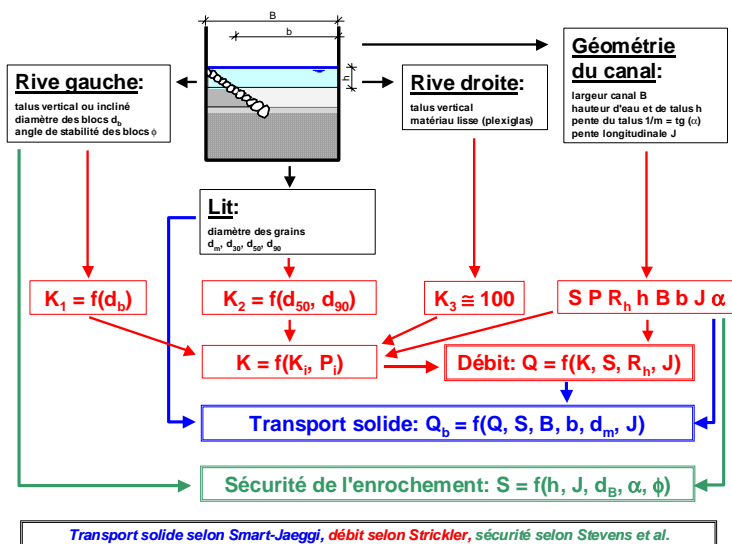


Figure 10: Schéma général de calcul

La pente longitudinale et la géométrie de la section transversale sont préalablement choisies (cf. 3.3.1 et 3.2.3). Le calcul suit ensuite le processus suivant:

1. Choix d'une granulométrie du lit et du talus (cf. 3.2.1, 3.2.2 et A1.1);
2. Calcul de la rugosité de la section, puis des débits et vitesses (cf. A1.2);
3. Estimation du transport solide (cf. A1.3 - A1.5):
 - Si le transport solide estimé est trop faible ou trop important, retour au point 1 et choix d'une nouvelle granulométrie du lit;
4. Contrôle de la rupture de la couche de pavage (cf. A1.6 - A1.7):

- Si la rupture de la couche de pavage n'est pas atteinte, retour au point 1 et choix d'une nouvelle granulométrie du lit;
5. Contrôle de la stabilité du talus (cf. A1.8 - A1.9):
- Si la stabilité du talus n'est pas garantie, retour au point 1 et choix d'une nouvelle granulométrie du talus.

Pour les calculs avec un talus ondulé, la section d'écoulement la plus petite (pointe des ondulations) a été choisie. Pour la stabilité du talus, la pente la plus importante a été retenue.

3.2.1 Granulométrie du lit

Le choix de la courbe granulométrique du lit a été soumis à trois conditions principales:

1. La courbe granulométrique doit être proche de celle d'un cours d'eau naturel. Elle ne doit donc pas être uniforme, mais plutôt étendue;
2. Les conditions d'écoulement doivent permettre la rupture de la couche de pavage (cf. 2.2.2);
3. Le diamètre minimal doit être de 2 mm, afin de garantir d'une part un échantillonnage (cf. Figure 8, point 11) correct (des sédiments plus fins passeraient au travers de la grille d'échantillonnage) et d'autre part une récupération complète des sédiments par les bacs filtrants (cf. Figure 8, point 13) pour pouvoir les réutiliser pour l'alimentation du modèle (cf. Figure 8, point 1 et 2).

Deux types de granulats à disposition remplissaient les conditions 2 et 3 (cf. Figure 11, "Granulats 1" et "Granulats 2"), mais pas la première.

Un mélange de ces deux granulométries a permis de remplir toutes les conditions. On remarque sur la Figure 11 que le mélange utilisé a une courbe granulométrique (appelée "Gravier DH") semblable à celle employée par HERSBERGER (2002) et à celle du sable provenant du Lac Léman (appelé "Sable Léman"), toutes deux proches de la granulométrie d'un cours d'eau naturel.

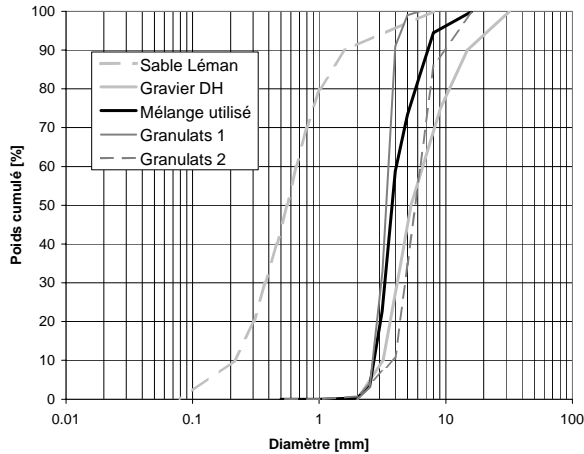


Figure 11: Courbe granulométrique du lit

La courbe granulométrique retenue est donnée en annexe (cf. A1.1). Ses diamètres caractéristiques principaux sont:

- $d_m = 4.6 \text{ mm}$;
- $d_{30} = 3.3 \text{ mm}$;
- $d_{50} = 3.8 \text{ mm}$ ($K_s = 53.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, selon formule 2.5);
- $d_{90} = 7.2 \text{ mm}$ ($K_s = 59.4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, selon formule 2.6).

3.2.2 Granulométrie du talus

La granulométrie du talus a été choisie selon le calcul itératif présenté au paragraphe 3.2 (cf. A1).

La couche supérieure, exposée à l'écoulement, est constituée de blocs de diamètre $d_B = 64 \text{ mm}$ ($d_B = 10 \div 15 \times d_m$ du lit). Des diamètres inférieurs (entre 32 et 64 mm) ont également été utilisés pour faciliter la mise en place. Les diamètres les plus petits ($d_{\min} = 1/2 d_B = 32 \text{ mm}$) se trouvent essentiellement en couche inférieure de l'enrochement.

Le d_{90} du talus a été admis égal au $d_{\max} = 64 \text{ mm}$. La rugosité du talus devient donc, selon la formule 2.6, $K_s = 33.4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Le coefficient FS est supérieur à 1 dans tous les cas.

La seule exception est le cas extrême avec l'enrochement ondulé et la pente de talus maximale de 4/5 (cf. 3.3.1) pour lequel le coefficient de sécurité vaut $FS = 0.98$. Ce cas n'a pas été retenu, car la portion de talus concernée se trouve au creux des anses créées par les ondulations et donc en principe pas sur l'écoulement principal.

Les facteurs de sécurité calculés selon STEVENS ET AL. (1976) sont:

- Talus régulier (pente $1/m = 2/3$), $FS = 1.17$;
- Talus ondulé (pente $1/m = 1/2$), $FS = 1.52$.

3.2.3 Pente du lit

La pente longitudinale du lit a été choisie à $J = 0.5\%$ pour des raisons de pratique expérimentale en relation avec la granulométrie du lit et les conditions d'écoulement.

Pour la granulométrie choisie et les hauteurs d'eau envisageables sur le modèle physique, une pente plus faible pouvait empêcher la rupture de la couche de pavage.

Une pente trop grande n'était pas souhaitable non plus, pour ne pas avoir un transport solide trop important.

D'autre part, il fallait également éviter de choisir une pente trop grande, afin que l'écoulement reste en régime fluvial ($Fr < 1$) et corresponde donc aux conditions d'un cas réel, puisque l'application du type d'enrochement modélisé est prévu pour des rivières à faible pente. Pour indication, la pente longitudinale du Rhône à l'amont du Léman est donnée en annexe (cf. A16).

3.3 Paramètres étudiés

Certains paramètres sont fixés et ne varient pas entre les essais:

- La géométrie du canal (cf. 3.1.1.1);
- La granulométrie du lit et du talus (cf. 3.2.1 et 3.2.2);
- La pente longitudinale du lit (cf. 3.2.3).

Les autres paramètres ci-dessous varient entre les essais:

- La configuration du talus et donc la géométrie de la section (cf. 3.3.1);
- Le débit d'écoulement (cf. 3.3.2).

Les paramètres suivants sont étudiés:

- Le transport solide (cf. 3.3.3 et 5.2);
- L'érosion en pied de talus (cf. 3.3.4 et 5.3);
- La stabilité des blocs de l'enrochement (cf. 5.4).

3.3.1 Géométrie du talus

3.3.1.1 Talus à pente régulière

Pour l'enrochement avec un pied de talus sans ondulation, la pente $1/m = 2/3$, utilisée usuellement pour ce type d'aménagement, a été retenue.

La hauteur de talus a été choisie à $h_{\text{talus}} = 0.15 \text{ m}$, pour obtenir une emprise de l'ordre du quart de la largeur du canal:

- Largeur du canal: $L = 1 \text{ m}$
- Hauteur du talus: $h_{\text{talus}} = 0.15 \text{ m}$
- Pente transversale du talus: $1/m = 2/3$
- Emprise du talus: $l_{\text{talus}} = h_{\text{talus}} / (1/m) = 0.225 \text{ m} \equiv L/4$

3.3.1.2 Talus ondulé

Pour l'enrochement avec pied de talus ondulé, les pentes extrêmes usuelles ont été retenues:

- Pente minimale: $1/m = 1/2$
- Pente maximale: $1/m = 4/5$

Avec une hauteur de talus $h_{\text{talus}} = 0.15 \text{ m}$ (cf. 3.3.1.1), les emprises de ces talus sont:

- Pente minimale: $1/m = 1/2$
- Emprise maximale du talus: $l_{\text{talus}} = h_{\text{talus}} / (1/m) = 0.3 \text{ m}$
- Pente maximale: $1/m = 4/5$
- Emprise minimale du talus: $l_{\text{talus}} = h_{\text{talus}} / (1/m) = 0.188 \text{ m}$

La profondeur ou amplitude des macro-rugosités e_d formées par les ondulations du talus (baies) est la différence entre les emprises minimale et maximale:

- Profondeur des macro-rugosités: $e_d = 0.3 - 0.188 = 0.112 \text{ m}$

L'écartement ou longueur d'onde des ondulations e_s (également noté λ) a été choisi égal à la largeur du canal ($l = 1 \text{ m}$) pour les parties rectilignes. Dans la courbe, cet écartement est de 10° , ce qui correspond à 1.04 m à l'axe du canal (pour un rayon de 6 m). A la pointe des ondulations ($R = 6.2 \text{ m}$), l'écartement vaut $e_s = 1.08 \text{ m}$.

Dans la courbe, les pointes des ondulations sont situées à $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ et 90° . Les anses sont décalées de 5° (à $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ et 85°).

Le ratio $e_s / e_d \equiv 10$ correspond aux recommandations données (e_s / e_d entre 10 et 15) par HERSBERGER (2002), pour des macro-rugosités composées de rainures sur des murs verticaux.

3.3.2 Débit d'écoulement

La limite inférieure pour les débits d'essais est imposée par la condition de rupture de la couche de pavage. Le calcul donné en annexes A1.6 et A1.7 montre qu'un débit $Q = 59.7 \text{ l/s}$ est nécessaire pour rompre le pavage.

La limite supérieure est imposée par la hauteur d'eau qui ne doit pas dépasser la hauteur du talus $h_{\text{talus}} = 0.15$ m. Cela correspond à un débit $Q = 108.9$ l/s (cf. A1.2).

Afin de garder une certaine marge vis-à-vis de ces valeurs limites, les débits d'essais suivants ont été choisis:

- $Q = 70$ l/s, assurant la rupture de la couche de pavage.
- $Q = 100$ l/s, assurant de maintenir la hauteur d'eau en dessous du sommet du talus.
- $Q = 85$ l/s, débit intermédiaire choisi entre les deux premiers.

3.3.3 Transport solide

La capacité de transport solide a été calculée selon SMART & JAEGGI (1983; cf. 2.2.1.2 et A1.3 - A1.5). Il s'agissait surtout d'une estimation permettant de prévoir la quantité totale de sédiments nécessaires pour les essais. Ce calcul est pris comme une estimation, car il ne tient pas compte de l'effet de la courbe.

Il s'agissait également de la valeur utilisée pour l'alimentation du modèle en sédiments au début des essais. Cette alimentation a ensuite été adaptée en cours d'essai, en fonction des contrôles du niveau d'eau amont (cf. 3.4.1 et A5).

Les hypothèses suivantes ont été faites pour le calcul:

- La vitesse est la même dans toute la section de l'écoulement;
- La partie d'écoulement prise en compte dans le calcul de transport solide est délimitée par la largeur du lit mobile.

3.3.4 Erosion du lit

La profondeur d'érosion du lit a été calculée selon KIKKAWA ET AL. (1976; cf. 2.4, formule 2.22). La formule utilise un rayon moyen R_m qui représente le point d'inflexion limitant les zones d'érosion et de dépôt. Dans le cas d'une section rectangulaire, le centre du miroir et le centre du lit sont confondus et correspondent à ce rayon moyen. Mais dans le cas d'un canal trapézoïdal, comme c'est le cas ici, les centres du miroir et du lit ne sont pas situés au même endroit.

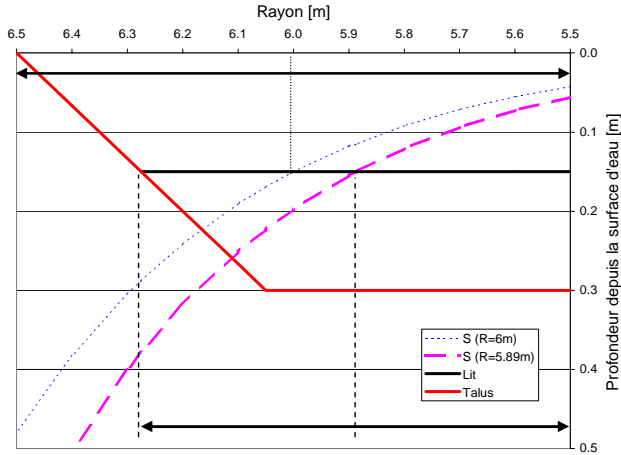


Figure 12: Calcul de l'érosion selon Kikkawa et al., position du point d'inflexion

Dès lors, lequel des deux employer pour le calcul? La Figure 12 montre le résultat pour ces deux cas de figure. L'affouillement maximum se trouve à l'intersection de la courbe d'érosion calculée et du talus. Il diffère sensiblement selon le choix de R_m .

Ce choix est fait ici sur la base du bilan entre les surfaces des zones d'érosion et de dépôt.

La Figure 13 indique clairement que ce bilan est équilibré en plaçant R_m au milieu du lit (partie gauche de la figure), alors qu'il ne l'est pas du tout si l'on place R_m au centre du miroir (partie droite de la figure).

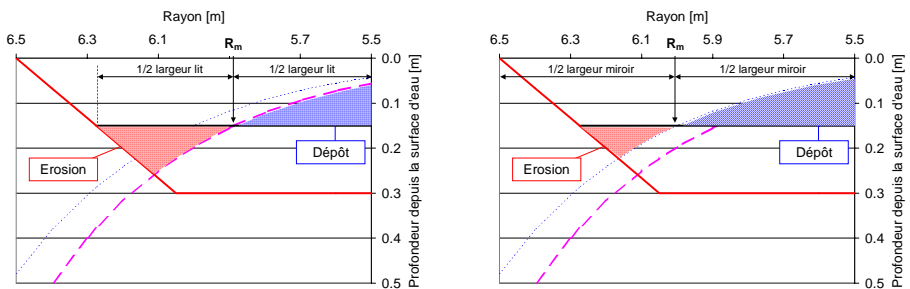


Figure 13: Calcul de l'érosion selon Kikkawa et al., bilan de l'érosion et du dépôt

Dans la suite de l'étude, le rayon moyen sera donc admis au centre du lit.

Pour la construction du modèle, une estimation initiale de la profondeur d'érosion était nécessaire. En prenant comme condition une hauteur d'eau h_m égale à la hauteur du talus

$h_{\text{talus}} = 0.15 \text{ m}$, on obtient une profondeur d'érosion, mesurée depuis la surface d'eau, de $h_s = 22.6 \text{ mm}$, c'est-à-dire un affouillement $h_s - h_m = 76 \text{ mm}$ (cf. A1.11).

Une grande marge d'erreur a été retenue pour la construction du modèle et l'épaisseur minimale du lit érodable a été fixée à 150 mm.

3.4 Procédure générale d'essai

3.4.1 Déroulement de l'essai physique

Les six essais sur modèle physique se sont déroulés selon le processus suivant:

1. Préparatifs avant l'essai:

- a. Relevé de la topographie du lit avec le cadre de mesure muni de capteurs à ultrasons (cf. Figure 8, point 15);
- b. Relevé manuel de la topographie des zones amont et aval situées hors de portée du cadre de mesure;
- c. Saturation et remplissage lent du canal ($Q = 5\div 10 \text{ l/s}$), sans alimentation en sédiments, avec le clapet aval (cf. Figure 8, point 10) relevé;
- d. Augmentation lente du débit avec purge des conduites d'alimentation en eau (cf. Figure 8, point 3);
- e. Quand le débit d'essai est atteint et stable, abaissement du clapet aval et début de l'alimentation en sédiments (cf. Figure 8, points 1 et 2). Lancement du chronométrage de l'essai.

2. Pendant l'essai:

Première phase, jusqu'à stabilisation de la topographie du lit, durée environ 4 heures:

- a. Contrôle périodique du débit fourni par les pompes, toutes les 30 minutes;
- b. Photos de l'écoulement (cf. A3.1);
- c. Contrôle périodique du niveau d'eau à l'amont du canal, toutes les 30 minutes;
- d. Prélèvement périodique d'échantillons à la sortie du canal d'essai (cf. Figure 8, point 11);
- e. En cas de variation du niveau d'eau amont, adaptation de l'alimentation en sédiments pour maintenir un niveau d'eau amont fixe. Estimation de l'alimentation nécessaire basée sur les échantillons prélevés à la sortie du canal;
- f. Observation de l'écoulement et mesures ponctuelles de l'évolution du lit (profondeur maximale du lit, niveau du lit contre la paroi intérieure du canal) au centre de la courbe (position 45°).

La situation est jugée stable quand:

- Le niveau d'eau amont ne varie plus;
- L'alimentation en sédiments à l'amont du canal correspond aux prélèvements d'échantillons réalisés à l'extrémité aval du canal;
- Le niveau du lit au centre de la courbe (profondeur maximale du lit, niveau du lit contre la paroi intérieure du canal) ne varie plus.

Deuxième phase, quand la situation est stabilisée:

- g. Relevé du niveau d'eau avec le cadre de mesure muni de capteurs à ultrasons (cf. Figure 8, point 15). A raison d'environ 30 minutes pour chacune des 8 positions du cadre de mesure, l'opération dure environ 4 heures;
- h. Poursuite des contrôles et échantillonnages périodiques;
- i. Si nécessaire, changement de bac de récupération (cf. Figure 8, point 13).

3. A la fin de l'essai:

- a. Arrêt de l'alimentation en sédiments (cf. Figure 8, points 1 et 2) et simultanément relevage du clapet aval;
- b. Diminution du débit, puis arrêt de la pompe d'alimentation.

La durée totale d'un essai est de 8 à 10 heures. Cette durée est surtout fonction des éventuels problèmes techniques lors des mesures de niveau d'eau. La stabilisation du lit a été atteinte en général après 3-4 heures d'essai.

4. Après l'essai:

Relevés finaux:

- a. Vidange lente du canal (plusieurs heures);
- b. Mesure de la topographie finale du lit avec le cadre de mesure muni de capteurs à ultrasons (cf. Figure 8, point 15);
- c. Relevé manuel de la topographie des zones amont et aval situées hors de portée du cadre de mesure;
- d. Photographies de la topographie finale et de la granulométrie du lit (cf. A3.2 - A3.6 et A6.2 - A6.4);
- e. Pour le dernier essai de chaque configuration (essais F01d et F06d, selon nomenclature, cf. 3.5), prélèvements d'échantillons de la couche supérieure du lit (cf. annexe A6.5).

Préparation de l'essai suivant:

- f. Vidange des bacs de récupération de sédiments (cf. Figure 8, point 13);
- g. Remise en place d'éventuels blocs de talus déplacés;
- h. Essai suivant: reprise au point 1c.

En cas de changement de la configuration du talus:

- i. Modification de la géométrie du talus;
- j. Remise en place du lit initial;
- k. Essai suivant: reprise au point 1a.

Les schémas et photos décrivant les préparatifs et le déroulement des essais sont présentés en annexe A2.

3.4.2 Traitement des résultats

Les traitements des mesures prises avant, pendant et après les essais sont les suivants:

1. Traitement des mesures de niveau (manuelles et capteurs ultrasons) avec le logiciel de traitement mathématique MATLAB:
 - a. Vue aérienne de la topographie du lit (cf. A4.1);
 - b. Différences de niveau entre la topographie initiale et la topographie relevée après essai (cf. A4.2);
 - c. Vue aérienne de la surface d'eau (cf. A4.3);
 - d. Différences de niveau d'eau avec le niveau d'eau moyen de l'essai (cf. A4.4);
 - e. Profils en travers de l'écoulement;
 - f. Volume de sédiments au-dessus du niveau de référence du canal d'essai.
2. Post-traitement des résultats obtenus avec MATLAB et des autres mesures réalisées pendant les essais:
 - a. Calcul des caractéristiques hydrauliques principales de l'écoulement (cf. 5.1);
 - b. Bilan des sédiments charriés et de l'érosion du lit (cf. 5.2.2, 5.3.2, A5 et A14);
 - c. Etablissement de la granulométrie des échantillons prélevés pendant et après les essais (cf. A1 et A6);
 - d. Introduction du lit initial dans les profils en travers (cf. A7);
 - e. Superposition des profils en travers des deux configurations de talus (cf. A8);
 - f. Etablissement de profils en long du niveau du lit et de la surface d'eau (cf. A9 et A10);
 - g. Superposition des profils en long des deux configurations (cf. A11.1);
 - h. Application de formules de calcul de la profondeur d'érosion et comparaison avec les profils en travers (cf. A12) et profils en long mesurés (cf. A11.2);
 - i. Comparaison des érosions calculées et mesurées (cf. A13).

3.5 Nomenclature utilisée pour les essais

L'utilisation du programme informatique MATLAB et la reprise partielle de traitements élaborés par HERSBERGER (2002) lors de ses expérimentations sur la même installation a nécessité l'adoption d'une nomenclature standardisée pour la désignation des essais.

Cette nomenclature, qui apparaît dans certains graphiques, permet d'identifier facilement l'essai selon les règles suivantes:

- La première lettre, "F", désigne la présente étude sur les enrochements;
- Les deux chiffres suivants désignent la géométrie de l'enrochement. Un talus régulier est désigné par les chiffres "01" et un talus ondulé avec une longueur d'onde de 10° est signalé par les chiffres "06"; une troisième série d'essai (cf. paragraphe 6.1.2) qui a été réalisée ultérieurement avec un talus ondulé modifié est désignée par les chiffres "07";
- La lettre finale indique le débit de l'essai, "a" pour 0 l/s, "b" pour 70 l/s, "c" pour 85 l/s et "d" pour 100 l/s.

Débit [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé	Talus ondulé modifié
0	F01a	F06a	F07a
70	F01b	F06b	F07b
85	F01c	F06c	F07c
100	F01d	F06d	F07d

Figure 14: Nomenclature utilisée pour la désignation des essais

Le tableau de la Figure 14 récapitule les noms de chacun des essais qui ont été réalisés. Pour les mesures de niveau, il y a une distinction qui est faite en ajoutant "-e" pour le niveau d'eau ou "-f" pour le niveau du fond (lit).

Pour exemple, la notation "F06c-e" désigne la mesure de niveau d'eau dans le cas de l'essai avec talus ondulé pour un débit de 85 l/s.

4. Résultats des essais

Les paragraphes 4.1 et 4.2 donnent une description générale des essais réalisés sur le modèle physique. Un bref résumé indique le nom de l'essai, la configuration du talus, le débit d'écoulement, la durée totale d'essai et la quantité de sédiments introduits sur le modèle (cf. Figure 15).

Les résultats des mesures sont traités en détail au chapitre 5 "Analyse et comparaison des résultats d'essais".

La troisième série d'essai (F07) est présentée au chapitre 6.

Forme du talus	Régulier			Ondulé			Ondulé modifié		
Nom de l'essai	F01b	F01c	F01d	F06b	F06c	F06d	F07b	F07c	F07d
Débit	70 l/s	85 l/s	100 l/s	70 l/s	85 l/s	100 l/s	70 l/s	85 l/s	100 l/s
Durée de l'essai	9.03 h	9.70 h	8.08 h	8.87 h	8.45 h	8.72	7.90 h	8.30 h	7.30 h
Alimentation totale en sédiments	532 kg	622 kg	697 kg	847 kg	907 kg	1237 kg	608 kg	813 kg	1120 kg

Figure 15: Résumé des essais

4.1 Essais avec talus à pente constante

Relevés topographiques des zones d'érosion et de déposition:

- Figure 16, Figure 17 et Figure 18.

Le lancement du premier essai a été précédé d'une augmentation progressive du débit, afin d'observer le comportement de la couche de pavage du lit qui selon le calcul préliminaire (cf. A1.7), devrait être rompue à un débit $Q = 59.7$ l/s.

Deux débits ont été examinés, $Q = 50$ l/s et $Q = 60$ l/s:

- Au débit $Q = 50$ l/s, aucun mouvement perceptible n'a été signalé;
- Au débit $Q = 60$ l/s, la couche de pavage a commencé à se rompre par endroits, en premier lieu dans la courbe du canal, mais également dans les tronçons rectilignes.

Cet aspect ne fait pas partie directement de l'étude, mais il est intéressant de voir que la rupture de la couche de pavage est survenue au débit estimé par le calcul préliminaire. Une observation plus précise du phénomène n'est pas aisée, car le moment exact de la rupture du pavage est difficile à déterminer.

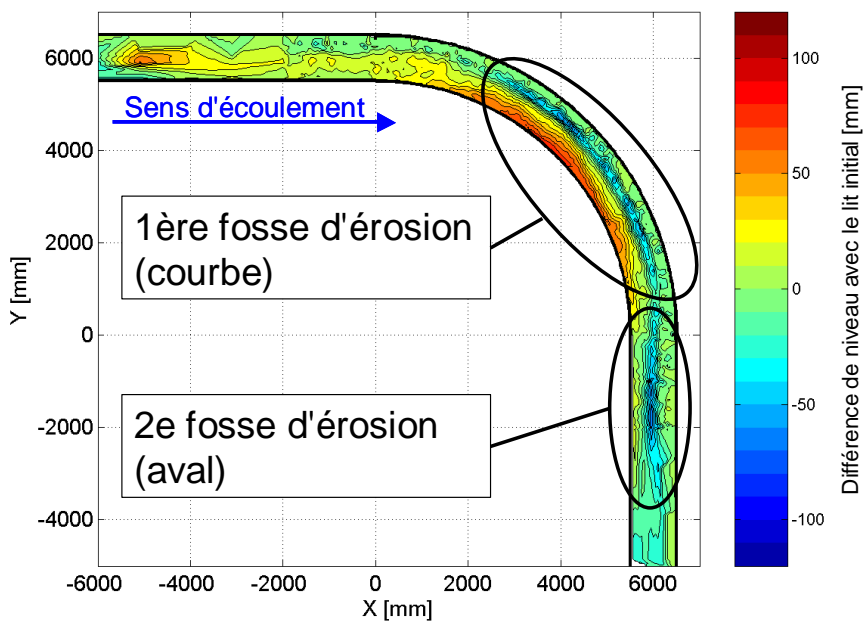
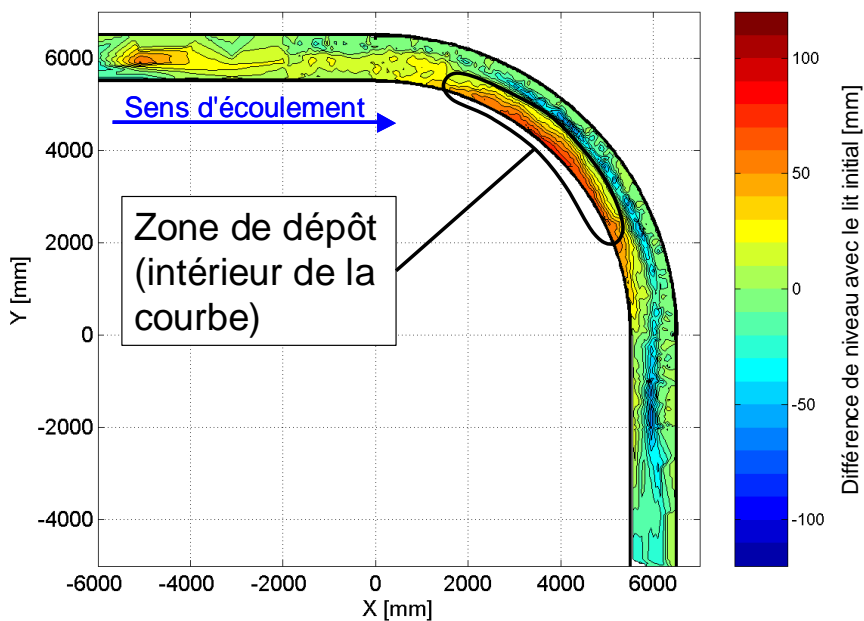


Figure 16: Essai F01b ($Q = 70$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



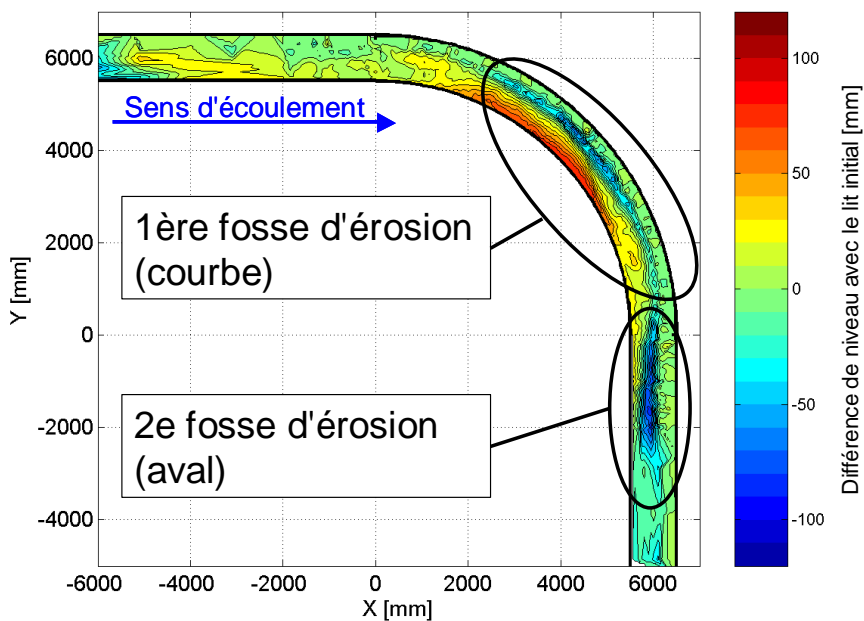
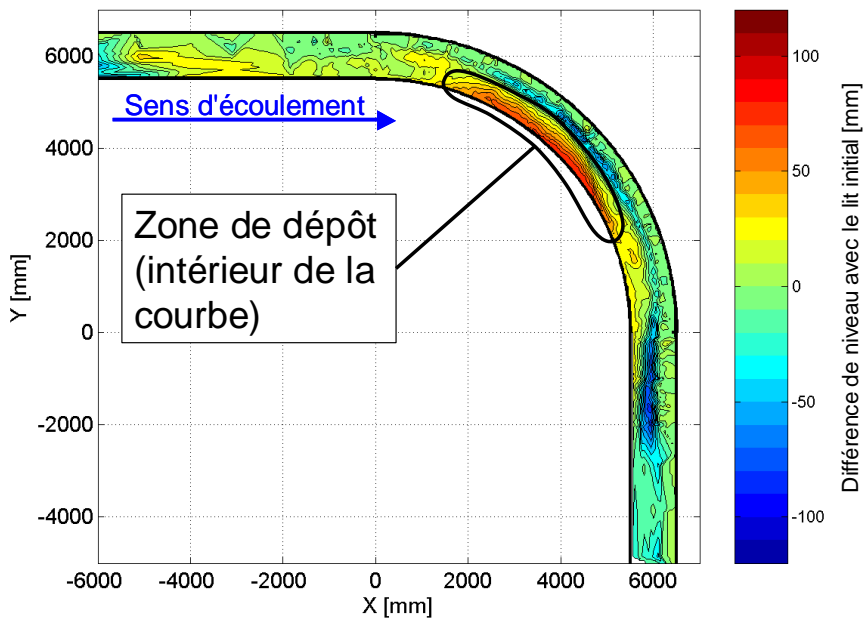


Figure 17: Essai F01c ($Q = 85 \text{ l/s}$), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



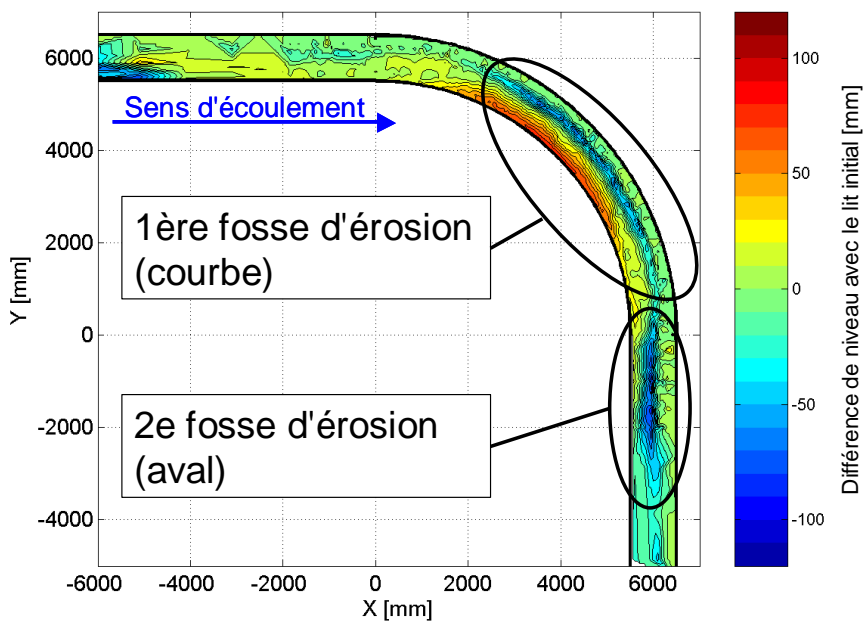
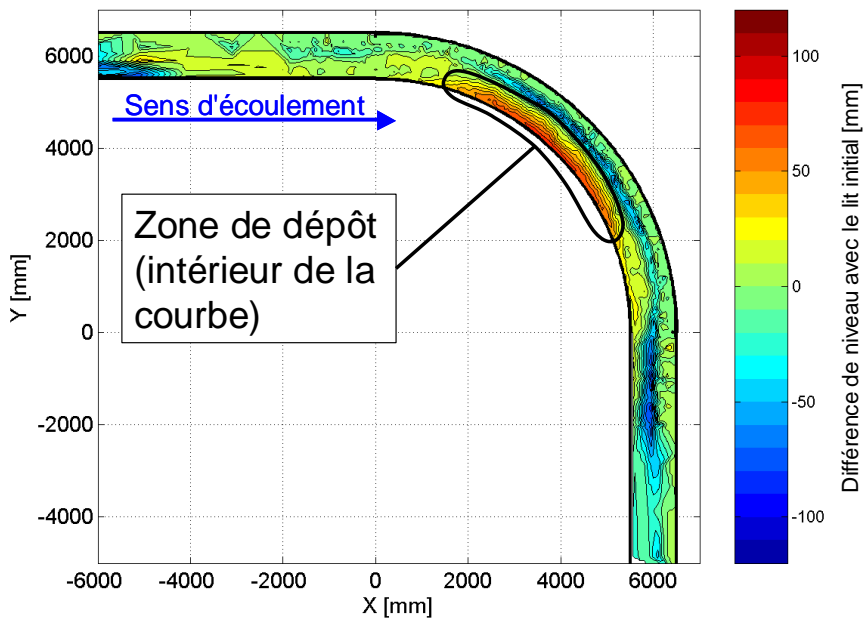


Figure 18: Essai F01d ($Q = 100$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



4.1.1 Essai 1 : talus à pente constante, $Q = 70 \text{ l/s}$

Annexes:

- | | |
|---|--------------|
| • Photos avant, pendant et après l'essai | A3 |
| • Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit | A4 |
| • Bilan des sédiments transportés | A5 |
| • Granulométrie des sédiments transportés | A6.1 et A6.2 |
| • Profils en travers de l'écoulement | A7.1 |
| • Profils en long de l'écoulement | A10 |

Observations:

- Deux grandes fosses d'érosion se sont développées (cf. Figure 16), au milieu et en aval de la courbe;
- La première fosse d'érosion se forme au pied du talus à partir d'un angle de 30° , dans le prolongement de la paroi intérieure amont (cf. Figure 19);
- La deuxième fosse se forme à la sortie aval de la courbe, où la rugosité due à l'écoulement en courbe disparaît et permet à l'écoulement d'accélérer. Sa position est plus éloignée du pied de talus, plutôt au centre du canal;
- Une zone de dépôt s'est formée à l'intérieur de la courbe, légèrement en amont de la fosse d'érosion (cf. Figure 16 et Figure 19);
- Un tri granulométrique est bien visible dans la courbe (cf. Figure 31), avec les éléments les plus fins à l'intérieur (zone de dépôt) et les plus grossiers à l'extérieur (zone de fort charriage, au pied du talus);
- Seuls quelques blocs d'enrochement, mal mis en place, ont bougé pendant l'essai, confirmant ainsi le calcul de stabilité du talus (cf. 3.2.2).

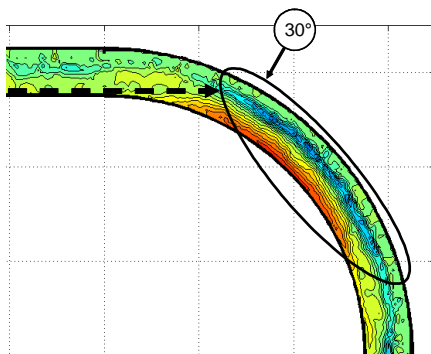


Figure 19: Extrémité amont de la fosse d'érosion en courbe, configuration avec talus régulier

4.1.2 Essai 2 : talus à pente constante, Q = 85 l/s

Annexes:

- Photos avant, pendant et après l'essai A3
- Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit A4
- Bilan des sédiments transportés A5
- Granulométrie des sédiments transportés A6.1 et A6.3
- Profils en travers de l'écoulement A7.2
- Profils en long de l'écoulement A10

Observations semblables à celles de l'essai F01b.

4.1.3 Essai 3 : talus à pente constante, Q = 100 l/s

Annexes:

- Photos avant, pendant et après l'essai A3
- Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit A4
- Bilan des sédiments transportés A5
- Granulométrie des sédiments transportés A6.1 et A6.4
- Granulométrie de la couche supérieure du lit, au milieu de la courbe A6.5
- Profils en travers de l'écoulement A7.3
- Profils en long de l'écoulement A10

Observations semblables à celles de l'essai F01b.

4.2 Essais avec talus à pente variable

Relevés topographiques des zones d'érosion et de déposition:

- Figure 20, Figure 21 et Figure 22.

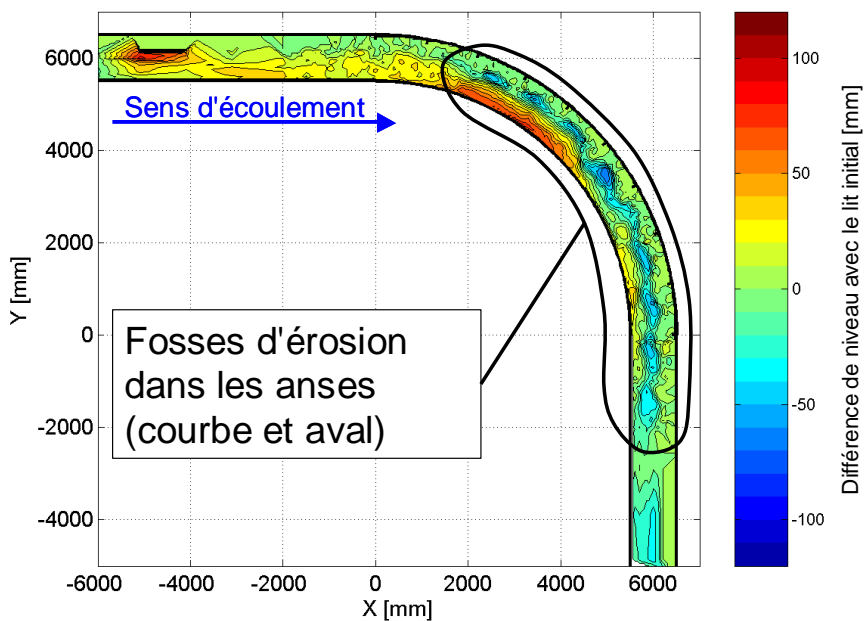
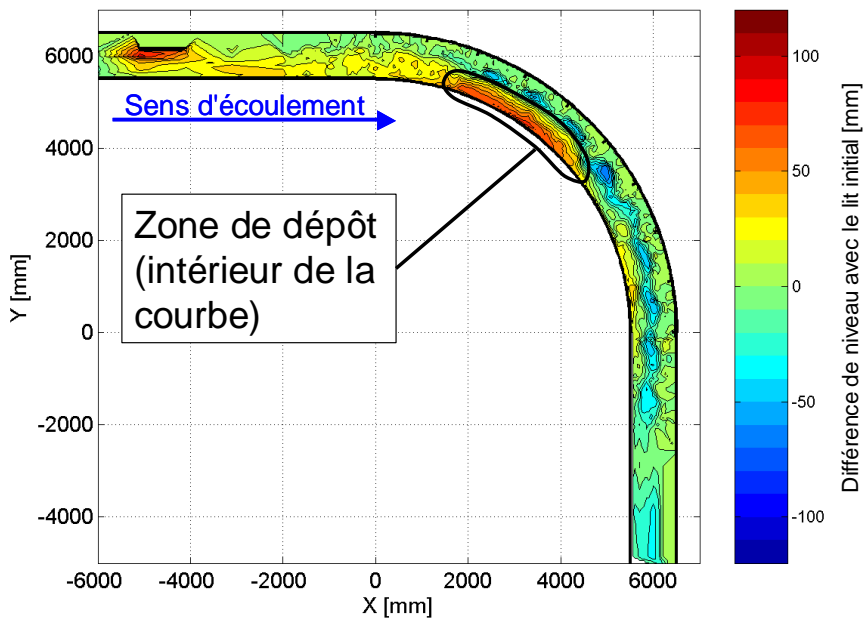


Figure 20: Essai F06b ($Q = 70$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



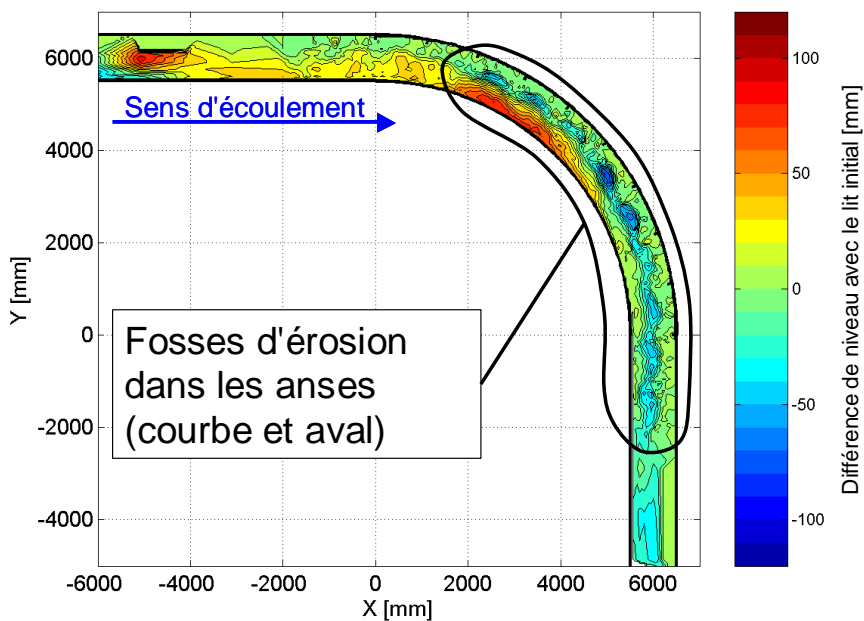
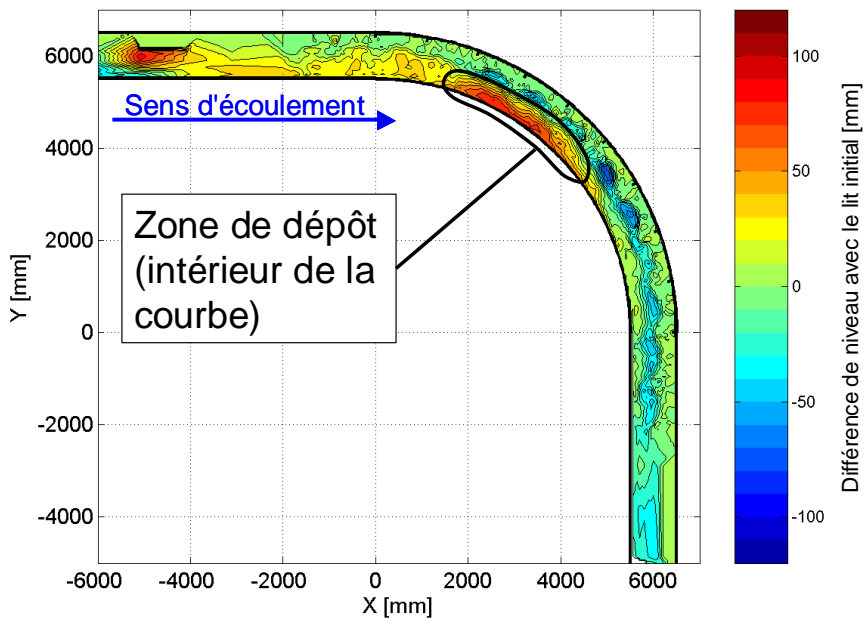


Figure 21: Essai F06c ($Q = 85 \text{ l/s}$), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



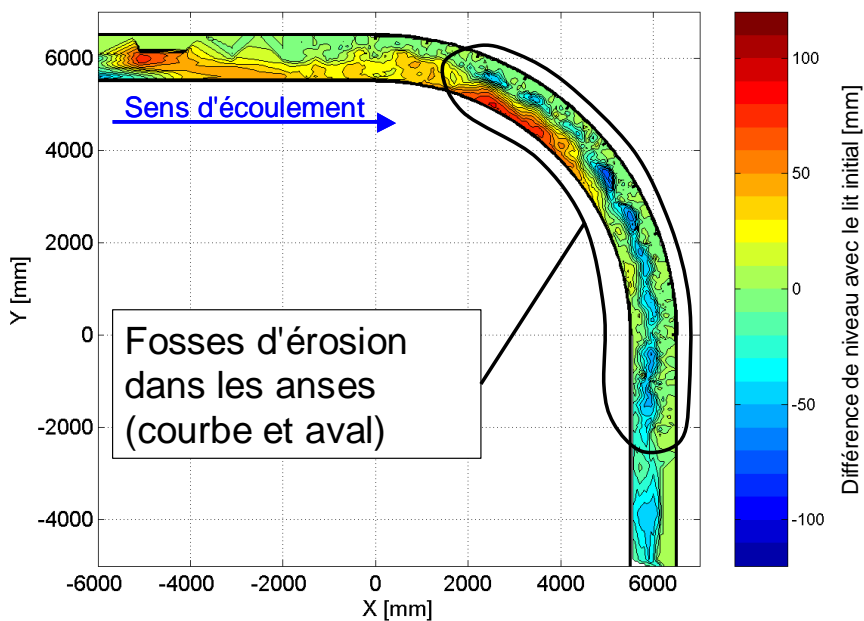
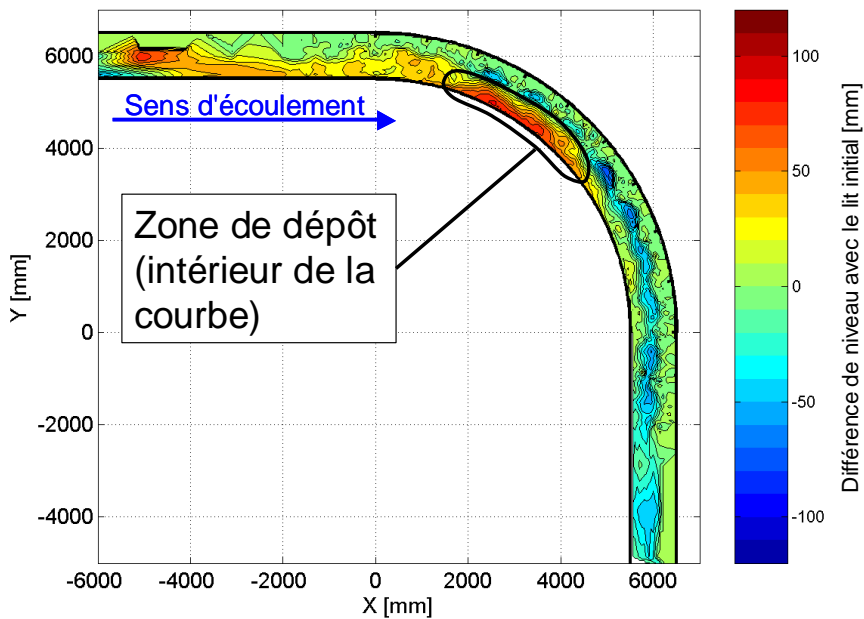


Figure 22: Essai F06d ($Q = 100$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



4.2.1 Essai 4 : talus à pente variable, Q = 70 l/s

Annexes:

- | | |
|---|--------------|
| • Photos avant, pendant et après l'essai | A3 |
| • Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit | A4 |
| • Bilan des sédiments transportés | A5 |
| • Granulométrie des sédiments transportés | A6.1 et A6.2 |
| • Profils en travers de l'écoulement | A7.1 |
| • Profils en long de l'écoulement | A10 |

Observations:

- De multiples fosses d'érosion se sont développées (cf. Figure 20) dans les anses formées au creux des ondulations du talus, principalement dans la courbe;
- La première fosse d'érosion se forme dans la baie située à un angle de 25°, dans le prolongement de la paroi intérieure amont (cf. Figure 23);
- La profondeur des fosses d'érosion diminue à partir des 2/3 de la courbe et progressivement vers l'aval. Contrairement au cas avec un talus régulier, la profondeur d'érosion continue de diminuer après la sortie aval de la courbe;
- Une zone de dépôt s'est formée à l'intérieur de la courbe, un peu plus en amont et un peu moins étendue que dans le cas de la configuration avec un talus régulier (cf. Figure 20);
- Un tri granulométrique est bien visible dans la courbe (cf. Figure 32), avec les éléments les plus fins à l'intérieur (zone de dépôt) et les plus grossiers à l'extérieur (zone de fort charriage, au pied du talus);
- Le transport solide des plus gros sédiments, le plus visible, s'est concentré essentiellement dans une bande d'environ 1/10 de largeur du canal, au pied de la pointe des enrochements;
- La résistance des enrochements n'a pas été suffisante par endroits, essentiellement en pointe d'ondulation. Des blocs de toutes tailles ont été arrachés au talus, ce qui indique une sous-estimation des sollicitations locales et que la méthode de dimensionnement utilisée (cf. 3.2.2) n'est pas adaptée à ce type de configuration de talus;
- La surface de l'écoulement est beaucoup plus perturbée que dans le cas avec un talus régulier. Cela est clairement perceptible sur les photos (cf. A3.1) et mesures de niveau (cf. A4.3 et A4.4). On peut même observer localement l'apparition d'un ressaut hydraulique noyé;
- A l'extérieur de la courbe, dans les creux des ondulations, on observe une zone de recirculation très calme (en tout cas en surface).

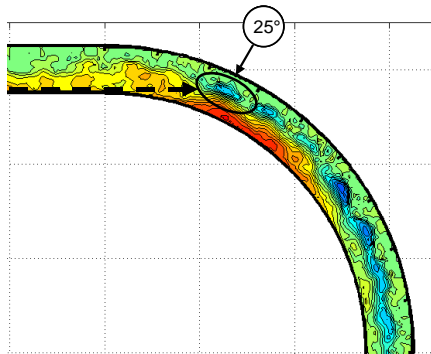


Figure 23: Extrémité amont de la fosse d'érosion en courbe, configuration avec talus ondulé

Une description détaillée du comportement de l'écoulement est donnée au paragraphe 4.2.4.

4.2.2 Essai 5 : talus à pente variable, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexes:

- Photos avant, pendant et après l'essai A3
- Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit A4
- Bilan des sédiments transportés A5
- Granulométrie des sédiments transportés A6.1 et A6.3
- Profils en travers de l'écoulement A7.2
- Profils en long de l'écoulement A10

Les observations sont semblables à celles faites pour l'essai F06b. Les références à la Figure 20 sont reportées sur la Figure 21.

Il faut signaler qu'un arrêt momentané de l'essai a été nécessaire en début d'expérience, car l'arrachage de blocs menait par endroits à une démolition importante de la pointe du talus. Une remise en place soigneuse des blocs a permis d'assurer une stabilité suffisante pour la reprise de l'expérience.

4.2.3 Essai 6 : talus à pente variable, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexes:

- Photos avant, pendant et après l'essai A3
- Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit A4
- Bilan des sédiments transportés A5
- Granulométrie des sédiments transportés A6.1 et A6.4
- Granulométrie de la couche supérieure du lit, au milieu de la courbe A6.5
- Profils en travers de l'écoulement A7.3
- Profils en long de l'écoulement A10

Les observations sont semblables à celles faites pour l'essai F06b. Les références à la Figure 20 sont reportées sur la Figure 22.

Comme pour l'essai F06c, il faut signaler qu'un arrêt momentané de l'essai a été nécessaire en début d'expérience, car l'arrachage de blocs menait par endroits à une démolition importante de la pointe du talus. Une remise en place soigneuse des blocs a permis d'assurer une stabilité suffisante pour la reprise de l'expérience.

4.2.4 Observations sur le comportement de l'écoulement sur talus ondulé

La configuration de l'enrochement avec une ligne de pied de talus ondulée amène de grandes perturbations locales de l'écoulement. Le comportement observé est semblable à celui d'un écoulement sur des épis immergés.

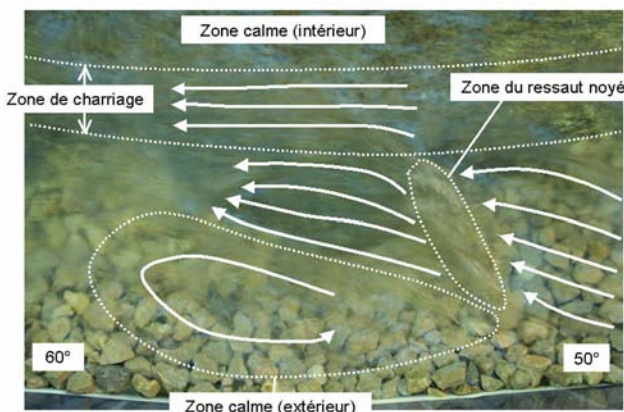


Figure 24: Vue aérienne de l'écoulement depuis la rive extérieure ($Q = 100\text{ l/s}$, position entre 50° et 60°)

Les observations faites pendant les essais ont permis d'identifier quatre zones principales (cf. Figure 24):

1. Une zone peu agitée à l'intérieur de la courbe, semblable à celle observée dans le cas du talus à pente régulière, où transitent les éléments les plus fins du lit mobile;
2. Une bande de faible largeur en pied de talus (appelée ici zone de charriage, 1/10 de la largeur du canal), où transitent les éléments les plus grossiers du lit mobile et où le charriage est le plus facilement observable;
3. Une zone très perturbée au-dessus de la pointe des ondulations, où une forte augmentation locale de la vitesse et de la pente de la ligne d'eau sont observées sur le versant aval avec parfois même l'apparition d'un ressaut noyé. On a donc une sorte de jet plongeant qui aboutit dans la baie aval, puis s'oriente en direction de l'intérieur de la courbe;
4. Une zone calme avec un écoulement de recirculation lent à l'extérieur de la courbe, au centre de la baie.

On distingue bien que les positions respectives de ces quatre zones sont fortement liées à la géométrie de l'enrochement (cf. Figure 26).

De manière générale, la surface de l'écoulement est beaucoup plus agitée que pour le cas du talus à pente régulière (cf. Figure 25, photos A3.1, niveaux A4.3 - A4.4, profils A9.3 et A10.1 - A10.4).

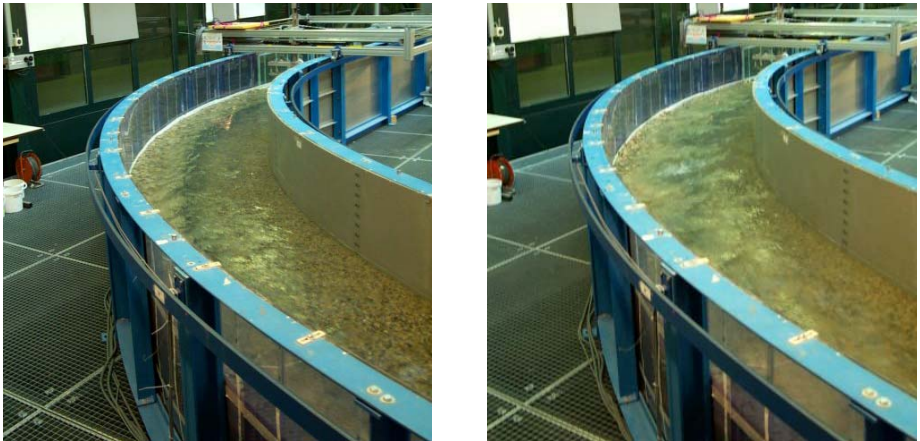


Figure 25: Surface de l'écoulement avec un talus régulier (gauche) et avec un talus ondulé (droite), $Q = 100 \text{ l/s}$

Le comportement hydraulique dû à cette configuration de talus a une influence sur le transport solide, l'érosion et la stabilité des blocs du talus (cf. Figure 27).

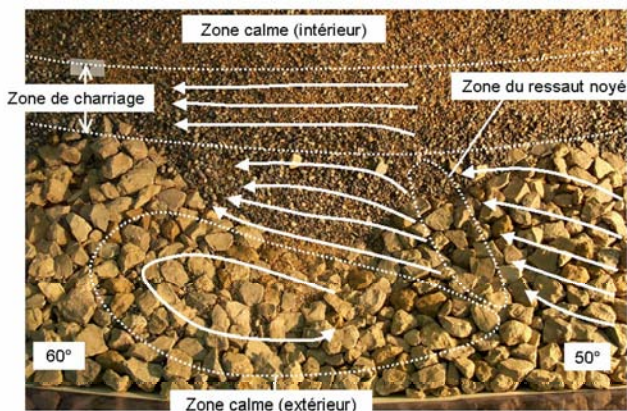


Figure 26: Vue aérienne du fond depuis la rive extérieure, après essai ($Q = 100 \text{ l/s}$, position entre 50° et 60°)

Ce type d'écoulement a pour conséquences (cf. Figure 27):

- Une érosion globale et un charriage des sédiments grossiers concentrés le long d'une ligne passant à l'extrémité de la pointe des ondulations;
- Une forte sollicitation en pointe d'enrochement, allant jusqu'à une mise en mouvement de blocs du talus;
- Une érosion locale dans les baies, due principalement au jet plongeant décrit ci-dessus;
- Un dépôt de sédiments fins dans la zone de recirculation, où la vitesse locale de l'écoulement n'est pas suffisante pour les remettre en mouvement.

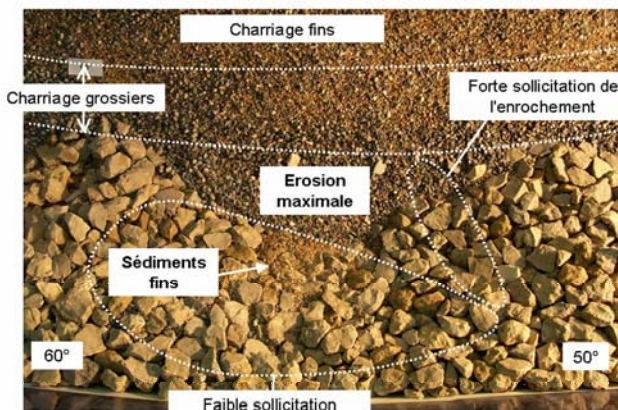


Figure 27: Vue aérienne des sédiments depuis la rive extérieure, après essai ($Q = 100$ l/s, position entre 50° et 60°)

5. Analyse et comparaison des résultats d'essais

5.1 Niveau d'eau amont, comparaison entre mesure et calcul

La formule de Manning-Strickler (cf. 2.1) met en relation le débit d'écoulement Q , la rugosité K_s , la pente J et les grandeurs géométriques S et R_h . Dans le cas présent, la géométrie de la section de l'écoulement est imposée (cf. 3.1.1.1), donc S et R_h peuvent être définies comme des fonctions de la hauteur d'eau h_m . La pente J est également imposée (cf. 3.2.3). La rugosité K_s est calculée en fonction des granulométries du lit et du talus (cf. 3.2.1 et 3.2.2). La section considérée pour la configuration avec pied de talus ondulé est la section réduite, c'est-à-dire celle qui est en pointe d'ondulation (pente $1/m = 1/2$).

Dans ces conditions, il y a une relation directe entre la hauteur d'eau h_m et le débit Q . La comparaison des hauteurs d'eau calculées et les mesures effectuées sur le modèle physique est présentée dans la Figure 28.

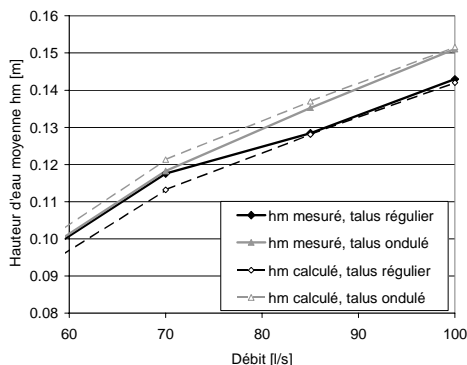


Figure 28: Hauteurs d'eau moyennes amont, comparaison entre valeurs mesurées et calculées

On remarque une bonne corrélation entre les hauteurs mesurées et calculées. Le calcul de la rugosité de section est donc correct et l'utilisation de la section réduite pour le cas talus ondulé est justifiée.

Ce résultat signifie que le canal avec un talus ondulé se comporte hydrauliquement comme un canal avec un talus régulier, dont la section correspond à la section réduite (pointe des ondulations, pente = $1/2$). Selon cette hypothèse, la surélévation du niveau d'eau amont est donc uniquement due à la réduction de section et pas à une augmentation de la rugosité.

A partir de cette détermination de la hauteur moyenne amont h_m , on peut ensuite déterminer les autres grandeurs hydrauliques de l'écoulement (S , P , R_h , V_m , Fr).

Ces paramètres (cf. Figure 29) serviront à la suite de l'analyse des essais, en particulier pour les calculs de profondeur d'érosion (cf. 5.3.2) et de stabilité de talus (cf. 5.4.2).

Type de talus (nom d'essai)	Q [l/s]	J [-]	h_m mesuré [m]	h_m calculé [m]	S [m ²]	P [m]	R_h [m]	V_m [m/s]	Fr [-]
Régulier (F01b)	70	0.005	0.118	0.113	0.097	1.092	0.089	0.72	0.68
Régulier (F01c)	85	0.005	0.129	0.128	0.112	1.134	0.098	0.76	0.68
Régulier (F01d)	100	0.005	0.143	0.142	0.125	1.173	0.107	0.80	0.68
Ondulé (F06b)	70	0.005	0.118	0.121	0.100	1.093	0.091	0.70	0.64
Ondulé (F06c)	85	0.005	0.135	0.137	0.115	1.143	0.100	0.74	0.64
Ondulé (F06d)	100	0.005	0.151	0.152	0.129	1.191	0.109	0.77	0.63

Figure 29: Grandeurs principales de l'écoulement

5.2 Transport solide

Les formules de transport solide sont en général valables pour un canal rectiligne et de géométrie uniforme. L'écoulement considéré est donc unidirectionnel, parallèle à l'axe du canal.

Le cas étudié ici ne correspond pas à ces conditions, puisque l'écoulement est en courbe, ce qui implique un courant secondaire perpendiculaire à l'axe du canal. Cela a pour conséquence une modification du comportement hydraulique et du processus de transport de sédiments.

Pour cette raison, on ne peut pas comparer directement la capacité de transport mesurée lors des essais sur le canal courbe avec l'estimation calculée avec la formule de SMART & JAEGGI (1983, cf. 3.3.3). On constate toutefois de manière générale (cf. A5) que la capacité de transport effectivement mesurée est sensiblement inférieure à la valeur calculée.

L'analyse des résultats présentée dans les paragraphes 5.2.1 et 5.2.2 porte donc uniquement sur la comparaison des érosions mesurées pour les deux configurations de talus. Le but est toujours de déterminer l'influence de la géométrie du talus sur le transport solide. On cherche finalement à savoir si l'aménagement d'un talus à pente variable risque ou non de diminuer la capacité de transport de l'écoulement.

5.2.1 Influence de la géométrie du talus, analyse qualitative

L'introduction d'une ondulation de talus apporte a priori une forte rugosité de forme. On peut donc craindre une perte de charge importante due à cette rugosité supplémentaire qui pourrait amener à une diminution de la capacité de transport.

Mais, comme cela a été montré au paragraphe 5.1, cette augmentation de rugosité n'est pas perceptible. La surélévation du niveau d'eau qu'on observe pour le cas du talus ondulé (cf. A9) est essentiellement due à la réduction de la section qui provoque une contraction de l'écoulement. Une contraction de l'écoulement apporte une augmentation de transport solide, ce qui est bien le cas ici.

Le tri granulométrique annoncé au paragraphe 2.4 (cf. Figure 6) est bien visible dans les deux configurations, comme on peut l'observer sur les Figure 31 et Figure 32.

Des échantillons ont été prélevés à la fin des essais et l'on voit que la taille des granulats est deux fois plus grande à l'extérieur qu'à l'intérieur de la courbe (cf. Figure 30 et A6.5).

Pour un talus régulier (cf. Figure 30), les diamètres moyens sont:

- $d_m = 4.0$ mm à l'intérieur de la courbe;
- $d_m = 7.8$ mm à l'extérieur de la courbe.

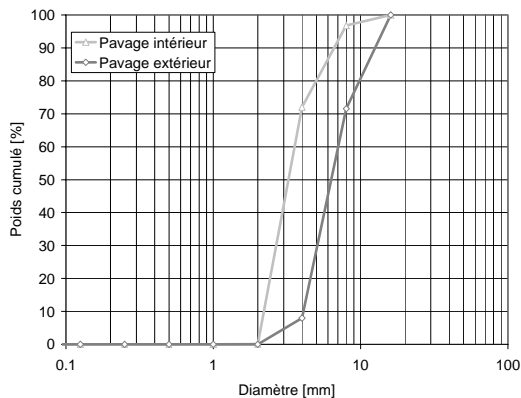


Figure 30: Granulométrie de la couche de pavage après essai, talus régulier ($Q=100$ l/s)

Les photos de ce tri granulométrique sont données pour toute la courbe du canal en annexes A6.2 à A6.4.

Dans le cas du talus ondulé (cf. Figure 32), on remarque un dépôt de sédiments fins à l'extérieur de la section. Ce phénomène a déjà été décrit au paragraphe 4.2.4.

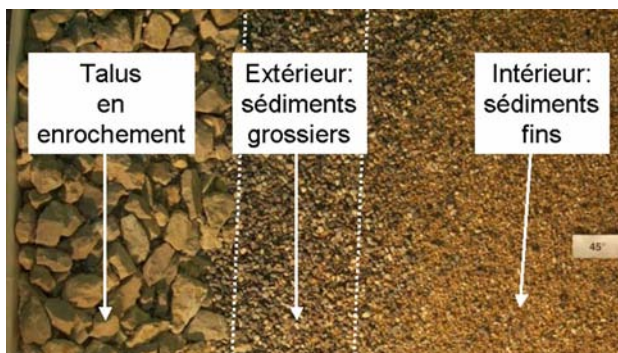


Figure 31: Essai avec talus régulier ($Q = 100$ l/s), tri granulométrique dans la courbe

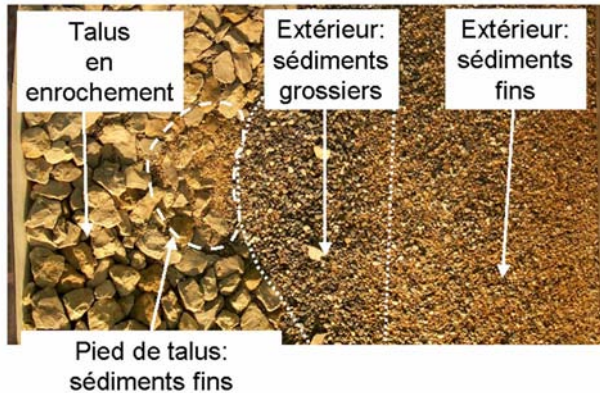


Figure 32: Essai avec talus ondulé ($Q = 100$ l/s), tri granulométrique dans la courbe

5.2.2 Influence de la géométrie du talus, analyse quantitative

La capacité de transport solide de l'écoulement a été déterminée par un bilan global des sédiments sortis du canal, c'est-à-dire tout ce que l'écoulement a été capable de transporter.

D'autres démarches plus justes en théorie n'ont pas été retenues, car plus difficiles à appliquer:

- Prélèvement d'échantillons à la sortie du canal. Malheureusement, on remarque (cf. A5.1) une dispersion importante des quantités de sédiments prélevés, signalant un charriage par vagues successives de sédiments plutôt qu'un processus continu. Un bilan basé sur des prélèvements périodiques (toutes les 30 minutes) n'est donc pas d'une fiabilité suffisante;
- Alimentation effective en sédiments à la fin de l'essai (lorsque la situation est stable) qui est connue avec précision (cf. A5.1 - A5.2). Mais il y a un problème de précision du contrôle du niveau d'eau amont.

Le bilan volumique des sédiments a été établi de la façon suivante:

$$V_{\text{aval}} = V_{\text{amont}} - \Delta V_{\text{canal}} \quad (5.1)$$

avec

V_{aval}	$[m^3]$:	volume total des sédiments sortis du canal
V_{amont}	$[m^3]$:	volume total des sédiments introduits dans le canal
ΔV_{canal}	$[m^3]$:	bilan des sédiments sur le canal (> 0 = dépôt, < 0 = érosion, en théorie = 0)

Le volume introduit et le bilan des sédiments sur le canal sont tirés des annexes A4.2 et A5.2.

Le poids des sédiments charriés est donné par:

$$P_{\text{aval}} = V_{\text{aval}} \cdot \rho_s \quad (5.2)$$

avec P_{aval} [kg] : poids total des sédiments sortis du canal
 V_{aval} [m³] : volume total des sédiments sortis du canal
 ρ_s [kg/m³] : masse volumique des granulats

Remarque: on aurait également pu obtenir ce résultat en pesant à la fin des essais la quantité de sédiments récupérés dans les bacs filtrants.

Ensuite, cette quantité de sédiments sortie du canal a été rapportée à la durée de l'essai pour connaître le charriage effectif:

$$Q_s = \frac{P_{\text{aval}}}{T} \cdot \frac{1000}{60} \quad (5.3)$$

avec Q_s [g/min] : charriage moyen pendant l'essai
 P_{aval} [kg] : poids total des sédiments sortis du canal
 T [h] : durée totale de l'essai

Ce transport solide calculé est reporté dans la Figure 33 pour chacun des essais. On remarque que la configuration avec talus ondulé provoque un charriage augmenté d'au moins 25%.

L'hypothèse faite au paragraphe 5.2.1, selon laquelle la réduction de largeur du lit mobile amène une hausse du transport solide est donc confirmée.

Cependant, on n'est pas ici dans un cas classique de rétrécissement de section: le lit mobile a été réduit de 10%, mais le débit au-dessus du lit mobile a également été réduit. En effet, si l'on observe la Figure 2, on remarque qu'avec un talus de pente 1/2, on augmente la part de débit qui passe au-dessus du talus et on diminue la part au-dessus du lit mobile.

Finalement, si l'on tient compte de ces remarques et qu'on les applique au calcul de transport solide selon SMART & JAEGER (1983) avec les hypothèses présentées aux paragraphes 2.2.1.2 et 3.3.3, on obtient une faible augmentation du transport solide (< 5%).

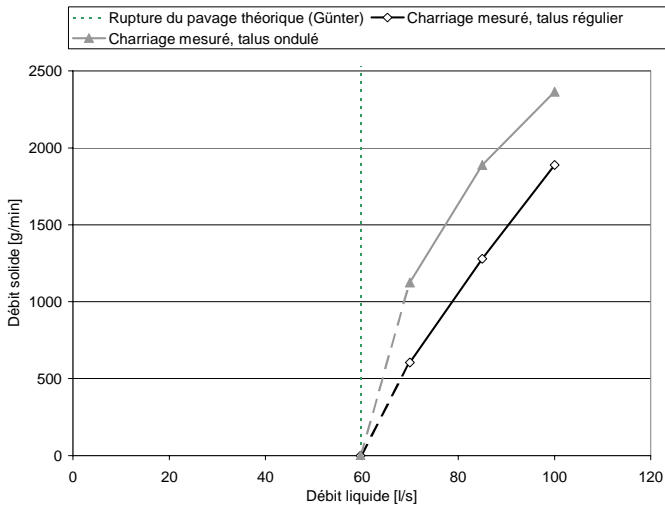


Figure 33: Relation entre débits liquide et solide

On constate donc une augmentation sensible de la capacité de transport que l'on ne peut pas justifier avec un calcul théorique classique de transport, prévu pour un écoulement rectiligne.

Le talus ondulé nous met donc vraisemblablement en présence d'un processus complexe, tri-dimensionnel, qui favorise le charriage, mais que les données récoltées pendant cette étude ne suffisent pas à expliquer.

Une recherche plus approfondie serait nécessaire pour comprendre le mécanisme de transport solide dans cette configuration particulière. Il faudrait en particulier effectuer des mesures de vitesses pour mieux comprendre leur répartition dans la section.

5.3 Erosion en courbe

Les observations effectuées pendant et après les essais (cf. chapitre 4) montrent que l'érosion est très différente entre les deux configurations de talus étudiées.

Une description, une explication et une comparaison de ces deux types d'érosion sont faites dans les paragraphes 5.3.1 et 0.

5.3.1 Influence de la géométrie du talus, analyse qualitative

La configuration du talus a une grande influence sur l'érosion observée sur le modèle physique.

La configuration avec un talus à pente régulière est un cas classique d'érosion en courbe avec un écoulement secondaire en spirale (cf. Figure 6).

La seconde configuration, avec un talus à pente variable, est un cas plus compliqué, car au phénomène d'érosion en courbe habituel s'ajoute l'effet des élargissements et rétrécissements successifs tout au long des ondulations du talus. Ces variations amènent une perturbation globale de l'écoulement secondaire, mais également de fortes perturbations locales avec en particulier de grandes augmentations de vitesse et de pente à l'aval des pointes des ondulations, à la façon d'un écoulement sur un épi immergé (cf. Figure 24).

De manière globale, la forme d'érosion observée est très différente entre les deux cas (cf. Figure 34):

- Avec un talus régulier (cf. Figure 34, partie gauche), on a la formation de deux grandes fosses d'érosion (cf. observations et figures du paragraphe 4.1), la première située dans la partie centrale de la courbe et la seconde après la sortie aval de la courbe;
- Avec un talus ondulé (cf. Figure 34, partie droite), on a une série de petites fosses d'érosion (cf. observations et figures du paragraphe 4.2) qui se développent dans les anses formées au creux des ondulations.

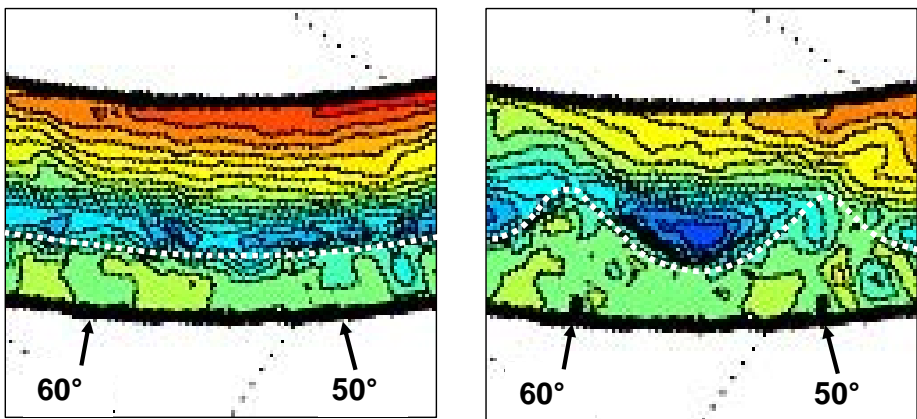


Figure 34: Comparaison des érosions mesurées pour le talus régulier (gauche) et le talus ondulé (droite), $Q = 100 \text{ l/s}$ (trait discontinu = pied de talus)

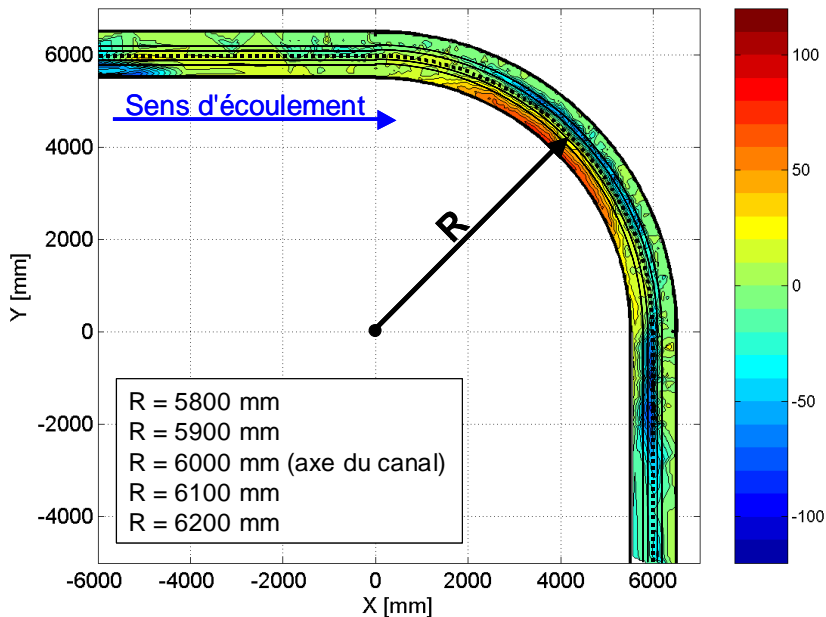
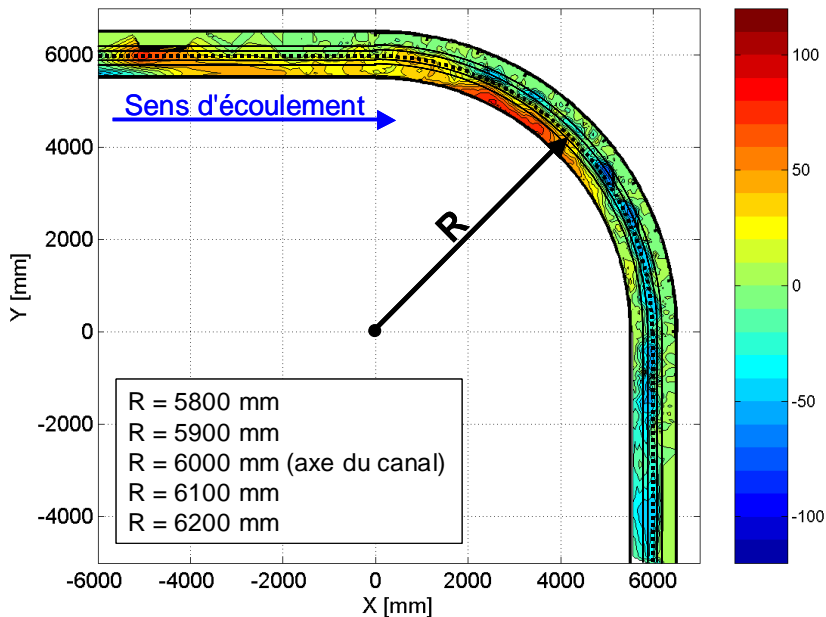


Figure 35: Axes des profils en long, pour un talus régulier (haut de la page) et un talus ondulé (bas de la page)



On a dans les deux cas une différenciation dans le positionnement transversal de l'érosion entre la courbe et l'aval de la courbe:

- On voit sur la Figure 35 que l'érosion dans la courbe est maximale pour un rayon $R = 6100$ mm et donc située dans la partie extérieure du canal (l'axe du canal est à $R = 6000$ mm);
- On voit également que l'érosion à l'aval de la courbe est maximale pour un rayon $R = 5900$ mm et donc située dans la partie intérieure du canal.

L'érosion qui pose le plus problème est celle qui se trouve le plus à l'extérieur du canal (position $R = 6100$ mm), car c'est celle qui est la plus proche du pied de talus. Elle est limitée dans une zone qui va de 1.5 m à l'amont de la courbe jusqu'à 2 m à l'aval et qui sera nommée "zone principale d'érosion" dans la suite du rapport.

On s'intéresse donc en priorité au profil en long situé à la position $R = 6100$ mm, représenté sur la Figure 36 (pour les autres profils en long, cf. A10). Pour la configuration avec talus régulier, il traverse la première fosse d'érosion qui se forme aux environs de 30° , puis diminue progressivement après 70° . Pour la seconde configuration, il passe par les fosses locales situées dans les anses formées par les ondulations du talus.

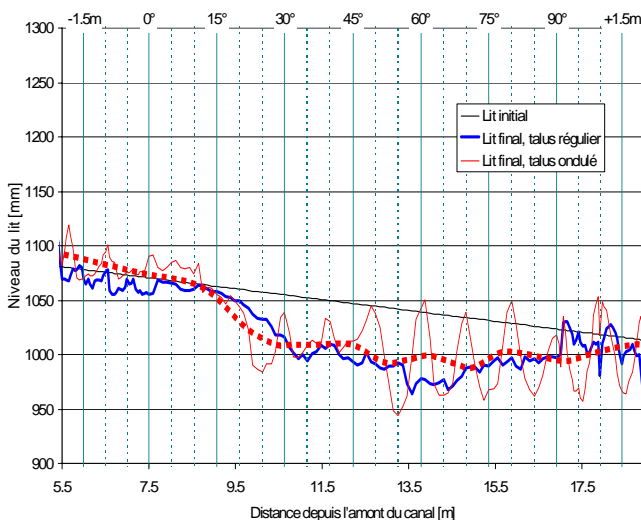


Figure 36: Comparaison des profils en long, $R = 6100$ mm, $Q = 100$ l/s (ligne discontinue = lit final lissé, talus ondulé)

Le profil en long prend une forme très différente selon la configuration du talus. On distingue bien sur la Figure 36 les deux types d'érosion provoqués par ces deux configurations.

Ces deux érosions différentes font qu'il est très difficile de déterminer dans quelle situation l'affouillement est le plus fort. Même en lissant la courbe du profil en long pour le cas du talus ondulé (cf. Figure 36, ligne discontinue), il est difficile d'évaluer quelle est l'érosion globale la plus importante. L'érosion paraît légèrement plus faible pour le cas avec un talus ondulé, dans la zone principale d'érosion, entre 30° et 70° .

La Figure 37 montre, pour trois sections qui se trouvent dans la zone où l'érosion est la plus forte, les profils en travers relevés pour les deux configurations, pour un même débit d'essai.

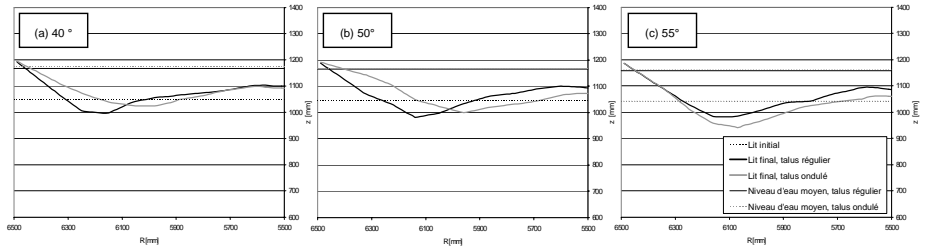


Figure 37: Comparaison de profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

Dans le profil à 40° (cf. cas (a), Figure 37), l'affouillement général et le point d'érosion maximale sont plus importants dans la configuration avec un talus régulier.

A l'inverse, dans le profil à 55° (cf. cas (c), Figure 37), l'affouillement général et le point d'érosion maximal sont plus importants avec un talus ondulé.

Alors que dans le profil à 50° (cf. cas (b), Figure 37), l'affouillement général est plus important avec un talus ondulé, mais le point d'érosion maximale est atteint avec un talus régulier.

Sur la base de ces observations, le bilan de la comparaison des érosions paraît neutre.

Pour y voir un peu plus clair, il faut essayer de comprendre le mécanisme de formation des fosses d'érosion. Le cas avec un talus régulier donne une érosion en courbe standard avec un creusement régulier en pied de talus.

Pour le cas avec un pied de talus ondulé, la Figure 38 montre l'alternance entre une érosion limitée en pointe d'ondulation et les fosses locales qui apparaissent dans les anses.

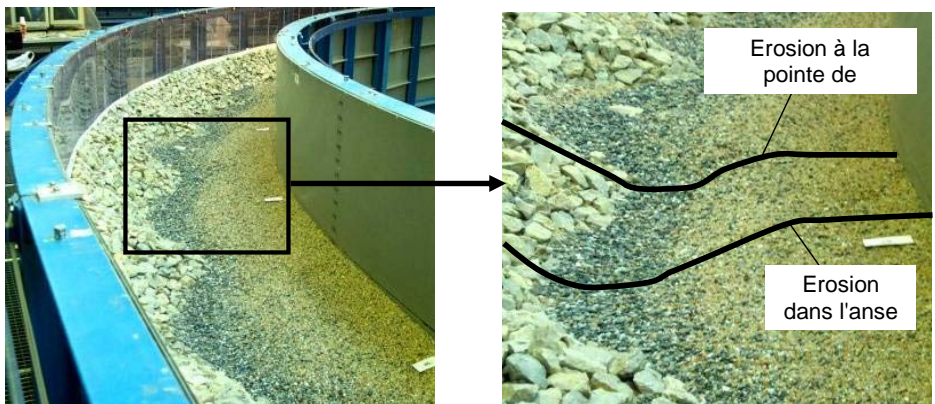


Figure 38: Erosion locale au pied du talus ondulé, vue depuis l'aval

Il y a en fait ici une superposition de deux phénomènes différents, présentée dans la Figure 39:

- Une érosion globale classique, comme dans le cas d'un talus régulier, qui suit une ligne qui passe par les points du pied de talus;
- Une érosion locale importante due à la forte accélération de l'écoulement au-dessus des pointes des ondulations, comme cela a été décrit au paragraphe 4.2.4.

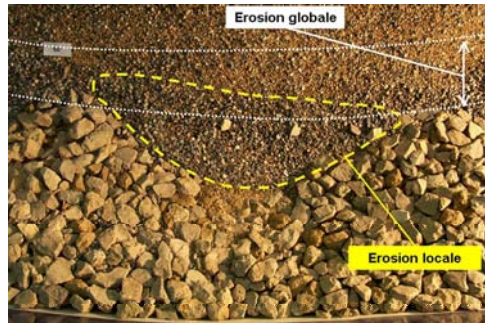


Figure 39: Superposition des zones d'érosion globale et locale

L'addition de ces deux érosions est défavorable. La forme du talus ondulé devrait donc être améliorée, afin d'éviter cette superposition et de diminuer les fortes érosions locales.

5.3.2 Influence de la géométrie du talus, analyse quantitative

Sur la Figure 36, on voit qu'il y a une érosion, mais il est difficile de définir à quel endroit celle-ci est la plus importante. Pour cette raison, la variation du niveau du lit par rapport au lit initial est reproduite dans la Figure 40. Cette représentation permet de mieux identifier les différentes fosses d'érosion. L'érosion calculée selon KIKKAWA ET AL. (formule 2.22) a également été reportée sur cette figure.

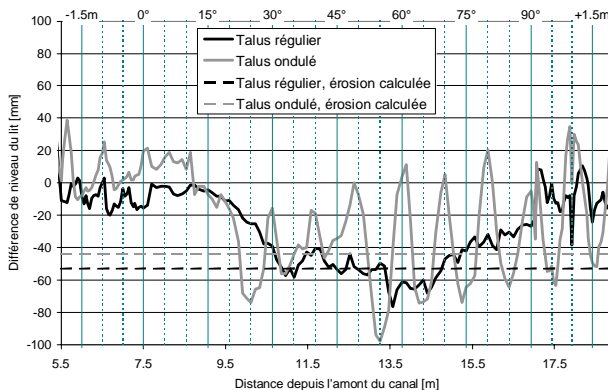


Figure 40: Comparaison des variations du lit, $R = 6100 \text{ mm}$, $Q = 100 \text{ l/s}$

Dans les deux configurations, l'érosion maximale est atteinte juste après le centre de la courbe, entre 55 et 60°. Il s'agit d'un des seuls points communs entre les deux configurations de talus.

Si localement l'érosion maximum est plus importante pour le cas avec un talus ondulé, l'érosion moyenne est de même ordre pour les deux configurations.

Les bilans des volumes de sédiments déposés ou érodés dans la zone principale d'érosion (cf. 5.3.1) sont basés sur les mesures de niveau données en annexe A14. Ils sont reportés dans la Figure 41.

On aperçoit sur cette figure que:

- Le niveau moyen du lit a été abaissé dans cinq essais sur six. Il y a donc une tendance générale à l'érosion;
- En valeur absolue, cet abaissement est faible, il est de l'ordre de grandeur du diamètre des granulats ($d_m = 4.6 \text{ mm}$);
- Selon le débit d'essai, l'abaissement est plus important pour l'une ou l'autre des configurations.

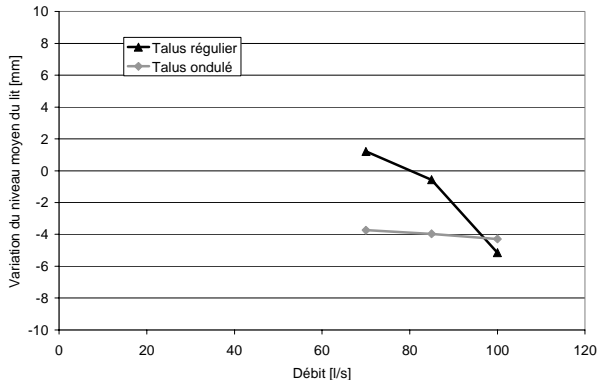


Figure 41: Modification du niveau moyen du lit dans la zone d'érosion principale

Il ne se dégage pas de tendance nette indiquant une érosion plus importante pour l'un des deux cas. Il est difficile de tirer des conclusions sur la base de ces courbes à seulement trois points. Des essais supplémentaires avec d'autres débits auraient peut-être permis une analyse plus fine.

Une comparaison entre les profondeurs d'érosion mesurées et calculées est présentée dans la Figure 40. La formule utilisée dans ce graphique est la version de la formulation de KIKKAWA ET AL. (1976) proposée par PETER (1986) (formule 2.22).

On remarque que la profondeur maximale mesurée est plus importante que celle qui a été calculée, mais que la profondeur moyenne des fosses d'érosion est proche de la valeur calculée.

Ce calcul d'érosion a été reporté sur les profils en travers présentés en annexe (cf. A12). On y voit, au centre de la courbe du canal d'essai, une bonne correspondance entre les érosions calculée et mesurée, d'une part quant à la profondeur maximale d'affouillement et d'autre part en ce qui concerne la géométrie du lit déformé.

Cependant, en aval du centre de la courbe, le calcul sous-estime l'érosion. Il y a un abaissement général du lit qui fausse la comparaison.

La comparaison des mesures avec les autres formules présentées au paragraphe 2.4 est présentée dans les annexes A11.3 et A11.4. Elles coïncident moins bien que la formule 2.22, pour les raisons suivantes:

- La version de la formule (formule 2.26, cf. A.11.3) de KIKKAWA ET AL. (1976) proposée par HERSBERGER (2002) (donne une érosion d'environ 20% plus faible que la formule 2.22, qui sous-estime déjà l'érosion mesurée;
- La formule proposée (formule 2.29, cf. A11.4, talus régulier) par HERSBERGER (2002, selon Bridge) surestime la profondeur d'érosion. De plus, elle donne très peu de variation de la profondeur d'affouillement en fonction du débit, ce qui ne correspond pas aux résultats d'essais. Il faut rappeler que cette formule a été développée pour un canal à parois verticales lisses, alors que les essais ont été réalisés avec une paroi extérieure inclinée et rugueuse;

- La seconde formule proposée (formule 2.31, cf. A11.4, talus ondulé) par HERSBERGER (2002, selon Bridge) surestime également la profondeur d'érosion. Elle a été développée pour un canal avec des macro-rugosités sur une paroi extérieure verticale. Mais les macro-rugosités ne sont pas du même ordre de grandeur que dans les essais étudiés. Cette formule suppose un rapport entre la profondeur des macro-rugosités e_d et le diamètre moyen des sédiments du lit d_m , de l'ordre de $e_d / d_m = 2.5$. Alors que dans les essais réalisés pour la présente étude, ce rapport vaut $e_d / d_m = 25$. Les conditions d'application de la formule ne sont donc pas remplies.

Les différentes analyses proposées ne permettent pas de distinguer quelle configuration d'enrochement provoque l'érosion la plus importante.

Une dernière analyse est proposée dans la Figure 42 et en annexe A13. Il s'agit de la comparaison entre les érosions maximales mesurées (cf. A12) dans les sections situées à la pointe des ondulations.

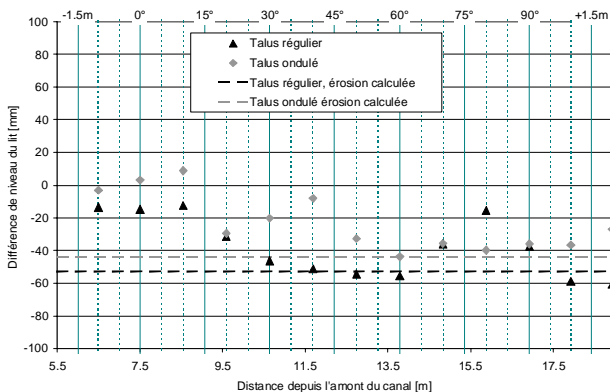


Figure 42: Comparaison des profondeurs maximales d'affouillement, sections en pointe d'ondulation, $Q = 100 \text{ l/s}$

Cette approche concerne des sections qui ne sont apparemment pas perturbées par l'érosion locale (cf. Figure 39).

Selon cette hypothèse, on peut considérer que l'affouillement mesuré dans ces sections est uniquement dû à l'érosion globale (cf. Figure 39). On observe alors pour ce cas particulier que le talus ondulé provoque une érosion plus faible que le talus régulier. Cela confirme donc que l'affouillement maximal dans le cas d'un talus ondulé est surtout dû à l'érosion locale (cf. Figure 39).

En conclusion, et comme cela a déjà été signalé au paragraphe 5.3.1, la proposition d'une meilleure géométrie de talus doit être basée sur l'idée de réduire cette érosion locale par jet plongeant (cf. 4.2.4), en particulier en réduisant la pente aval de la pointe des ondulations. Cette réduction de pente est abordée dans le chapitre 6.

5.4 Stabilité de l'enrochement

Les blocs utilisés pour la réalisation de l'enrochement étaient les mêmes pour les deux configurations de talus (cf. 2.3 et 3.2.2 pour le dimensionnement).

L'enrochement est resté très stable tout au long des essais avec un talus à pente régulière. Seuls quelques blocs mal mis en place ont bougé, sans incidence toutefois sur la stabilité générale du talus.

Par contre, des problèmes d'instabilité sont apparus lors des essais avec la seconde configuration (avec un talus ondulé). Dès le début de l'essai et déjà pour le plus faible débit ($Q = 70$ l/s), des blocs d'enrochement ont été arrachés au talus. Des blocs de toutes tailles, jusqu'aux diamètres les plus gros ($d = 64$ mm), ont été mis en mouvement.

Pour les débits plus importants ($Q = 85$ l/s et $Q = 100$ l/s), un arrêt momentané de l'essai a même été nécessaire en début d'expérience, car l'arrachage de blocs engendrait par endroits une démolition importante de la pointe du talus. Une remise en place soignée des blocs a permis d'assurer une stabilité suffisante pour la reprise de l'expérience.

Cette déstabilisation locale du talus est a priori étonnante, car elle survient là où la pente de l'enrochement est la plus faible ($1/m = 1/2$) et donc théoriquement dans la zone qui devrait être la plus stable. Il y a de toute évidence un phénomène local qui n'est pas pris en compte dans le dimensionnement standard de ces blocs d'enrochement.

Les deux paragraphes suivants (5.4.1 et 5.4.2) sont consacrés à l'explication de ce phénomène, puis à la recherche d'une solution pour éviter son apparition ou diminuer son importance.

5.4.1 Arrachage de blocs du talus ondulé, analyse qualitative

La raison pour laquelle des blocs se sont mis en mouvement est que la sollicitation a été plus importante qu'attendue.

Le dimensionnement des blocs de talus (cf. 2.3) suppose un écoulement uniforme avec une pente et une hauteur d'eau constantes. Mais dans le cas étudié, ces conditions ne sont pas respectées. Les observations indiquées sur la Figure 24 montrent bien qu'il y a localement de très fortes variations de la pente de la ligne d'eau, allant même jusqu'à provoquer l'apparition d'un ressaut hydraulique.

Cette variation de la pente doit donc être prise en compte dans le dimensionnement des blocs de l'enrochement, au travers d'un facteur correctif.

On obtiendra ainsi un nouveau dimensionnement qui aboutira à un diamètre de blocs majoré.

5.4.2 Arrachage de blocs du talus ondulé, analyse quantitative

Comme cela a été montré au paragraphe 5.4.1, la pente longitudinale de l'écoulement peut avoir de fortes variations locales.

Afin de déterminer la majoration de pente à introduire dans le dimensionnement des blocs d'enrochement (cf. 2.3), la démarche suivante a été suivie:

1. Reprise du calcul de stabilité de l'enrochement pour le cas où les blocs ont été mis en mouvement (talus ondulé, $Q = 70$ l/s), pour les plus gros blocs déplacés ($d_B = 64$ mm);

2. Recherche d'un facteur de correction de la pente, permettant d'atteindre la valeur limite du facteur de sécurité $FS = 1$; c'est-à-dire qu'on recherche quelle est la pente nécessaire à la mise en mouvement du bloc considéré.

Les résultats de cette démarche sont présentés en annexe A15. Il apparaît qu'une majoration de pente longitudinale d'un facteur $\omega = 6.6$ est nécessaire pour expliquer la déstabilisation du talus, pour un débit $Q = 70$ l/s (cf. A15.1).

Cette valeur peut paraître élevée à première vue, mais les mesures de niveau d'eau confirment que cette majoration n'est pas exagérée. Localement la pente de la surface d'eau peut atteindre près de 20% (cf. Figure 43), ce qui représente une majoration d'un facteur 40 par rapport à la pente du lit de 0.5%.

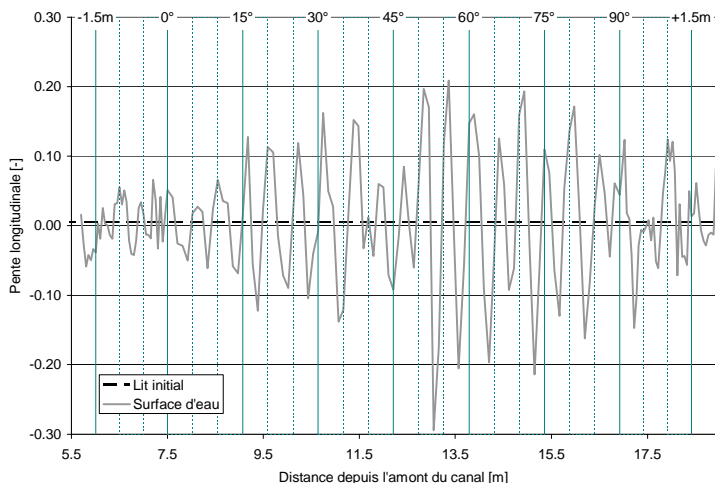


Figure 43: Variation longitudinale de la pente de la surface d'eau, $R = 6100$ mm, $Q = 100$ l/s

En admettant ce facteur correctif de la pente longitudinale $\omega = 6.6$, on peut estimer la majoration qu'il faudrait appliquer au diamètre des blocs afin d'assurer leur stabilité.

Ce calcul est donné en annexe A15.2 et montre que pour assurer un facteur de sécurité $FS = 1$, il faudrait majorer le diamètre des blocs d'un facteur $\delta = 1.4$, pour le cas d'un débit $Q = 100$ l/s. Pour garantir un facteur de sécurité $FS = 1.3$, on obtient $\delta = 3$.

Cette augmentation de diamètre des blocs est importante. Un facteur $\delta = 1.4$ appliqué au diamètre représente une multiplication par $\delta^3 = 2.9$ du volume et donc du poids des blocs. Afin d'éviter une augmentation du poids des blocs, il vaut mieux agir sur la cause du problème en limitant la pente de l'écoulement. Pour cela, il faut modifier la géométrie de l'enrochement, en particulier en diminuant sa pente aval. Ces modifications seront discutées dans le chapitre 6.

Il est à souligner que les conditions des essais traités ici sont assez défavorables. La pente longitudinale du modèle physique de 0.5% est importante et implique une valeur élevée du nombre de Froude (cf. Figure 29), ce qui favorise l'apparition d'un ressaut hydraulique au-dessus de l'enrochement (cf. Figure 24).

Si on fait passer la pente de 0.5% à 0.2%, le nombre de Froude passe, pour le cas de l'essai F06d, de $Fr = 0.63$ à $Fr = 0.40$. Dans ce cas, l'apparition d'un ressaut hydraulique est moins probable et donc la sollicitation des blocs d'enrochement et l'érosion locale devraient être plus faibles.

6. Essais complémentaires avec un talus ondulé modifié

Une application à un cours d'eau réel de la géométrie d'enrochement avec un talus ondulé testée est envisageable, mais une modification de cette géométrie est souhaitable, afin d'améliorer les résultats en matière d'érosion et de stabilité de talus.

Une nouvelle géométrie est présentée au paragraphe 6.1.1. Des essais complémentaires sur modèle physique sont proposés, afin de déterminer si cette solution est effectivement favorable.

Une série d'essais complémentaires avec un enrochement ondulé modifié est présentée et analysée au paragraphe 6.1.2.

D'autres essais envisageables sont proposés au paragraphe 6.1.3.

6.1 Proposition d'essais complémentaires

6.1.1 Deuxième variante de talus ondulé

Le principal changement de configuration proposé pour améliorer les conditions d'écoulement sur le talus ondulé, afin de diminuer l'érosion locale (cf. 5.3) et la sollicitation sur les blocs d'enrochements (cf. 5.4), est une modification de la ligne de pied de talus réduisant la pente dans la direction de l'écoulement de l'enrochement.

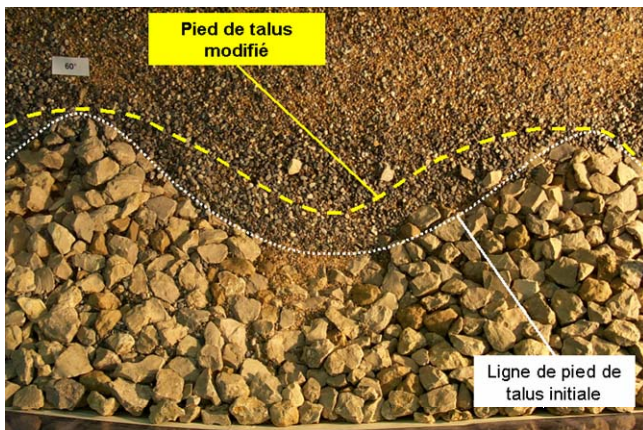


Figure 44: Première proposition de talus modifié

La proposition consiste à diminuer la pente latérale de la pointe de l'enrochement par une réduction de l'amplitude de l'ondulation du pied de talus (cf. Figure 44).

Cette solution modifie la pente du talus des côtés aval et amont de la pointe de l'ondulation. L'intervention côté amont semble superflue, car les problèmes rencontrés sont surtout dus à l'accélération de l'écoulement sur le côté aval.

La deuxième proposition est une variante de la première, ne modifiant la ligne de pied de talus que du côté aval cette fois-ci.

Cette solution (cf. Figure 45) paraît meilleure que la première. Mais ces propositions ont toutes deux le désavantage de réduire fortement la taille et la profondeur de la baie située au creux de l'ondulation. Il faut maintenir une baie d'une taille suffisante, si on veut offrir à la faune aquatique une zone calme (cf. Figure 24) pour faciliter sa migration.

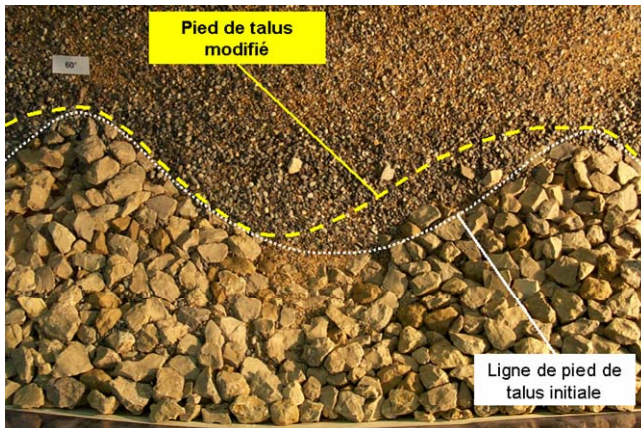


Figure 45: Deuxième proposition de talus modifié

La solution est donc à chercher en gardant l'idée de réduction de la pente aval du talus ondulé (cf. Figure 45), mais en visant à conserver une baie la plus étendue possible (cf. Figure 46).

La ligne de pied de talus reprend la pente aval de la seconde proposition (cf. Figure 45), mais le centre de la baie est cette fois-ci maintenu dans sa position initiale, à l'extérieur de la courbe, ce qui permet de conserver la profondeur initiale des anses.

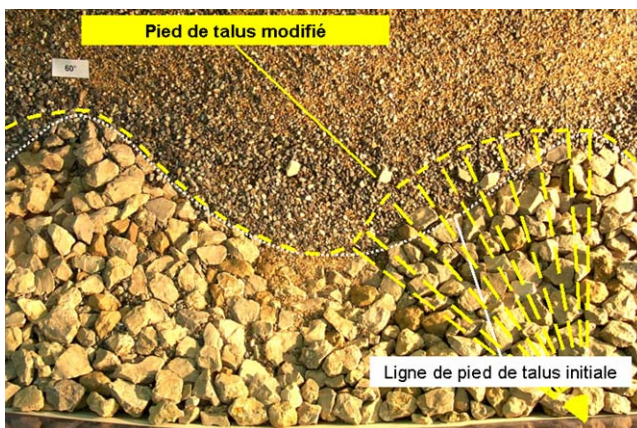


Figure 46: Troisième proposition de talus modifié

Pour conserver une taille suffisante de la baie, une légère augmentation de la longueur d'onde de l'ondulation est proposée: $\lambda = 1.2 L = 1200 \text{ mm}$ (12° dans la courbe).

Dans la courbe, les pointes des ondulations sont situées à 0° , 12° , 24° , 36° , 48° , 60° , 72° , et 84° . Les anses sont décalées de 6° (à 6° , 18° , 30° , 42° , 54° , 66° , 78° et 90°).

Cette solution a été retenue pour une série d'essais complémentaires sur le modèle physique dont les résultats sont présentés au paragraphe 6.1.2.

6.1.2 Essais avec talus à ondulé modifié

Relevés topographiques des zones d'érosion et de déposition:

- Figure 47, Figure 48 et Figure 49.

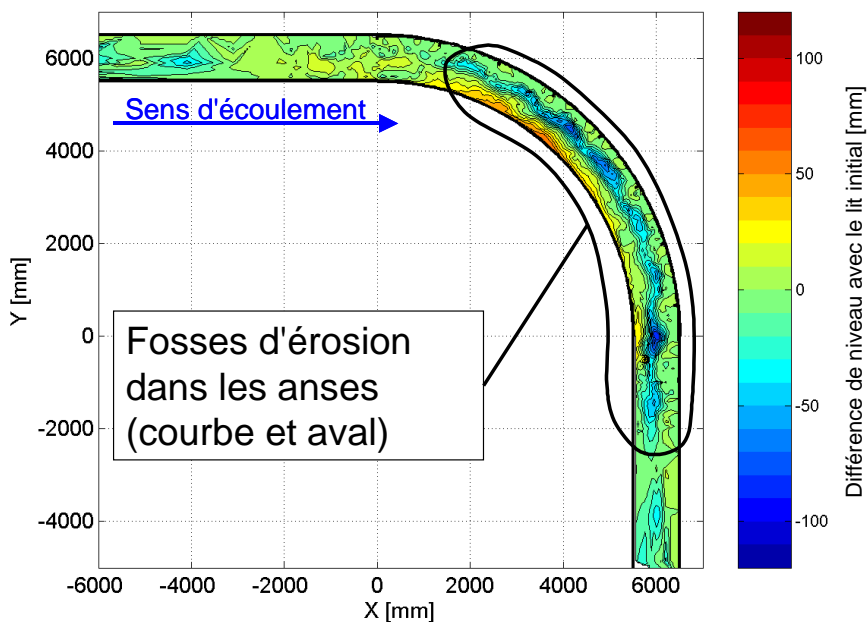
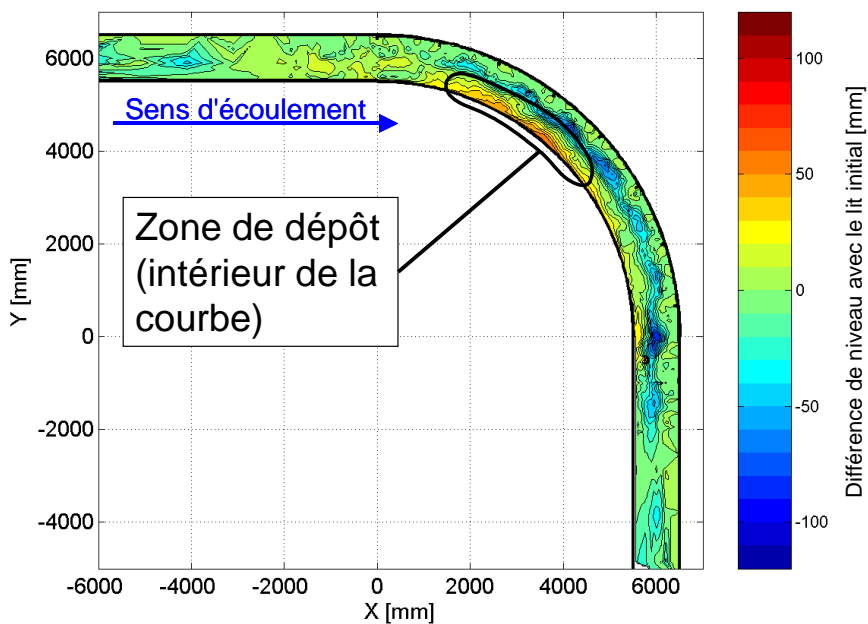


Figure 47: Essai F07b ($Q = 70$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



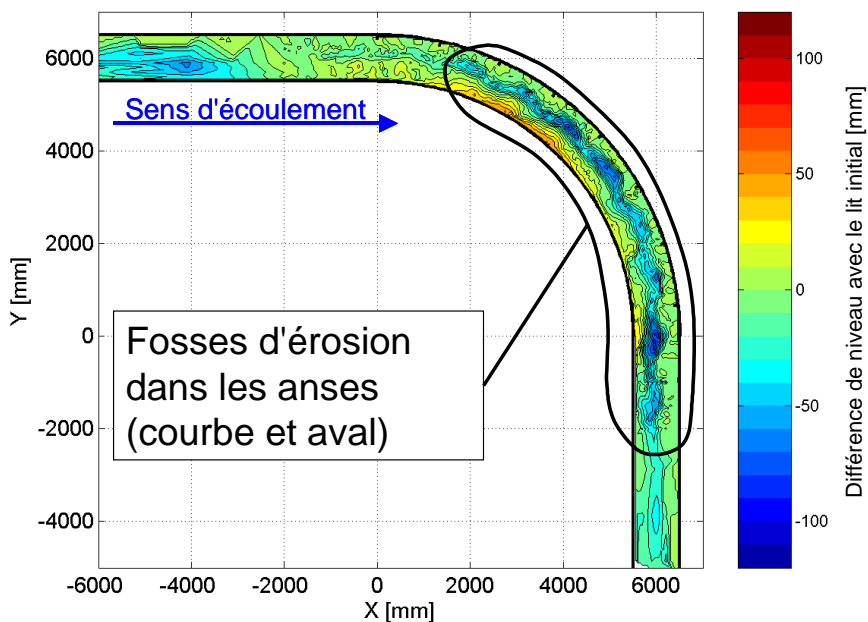
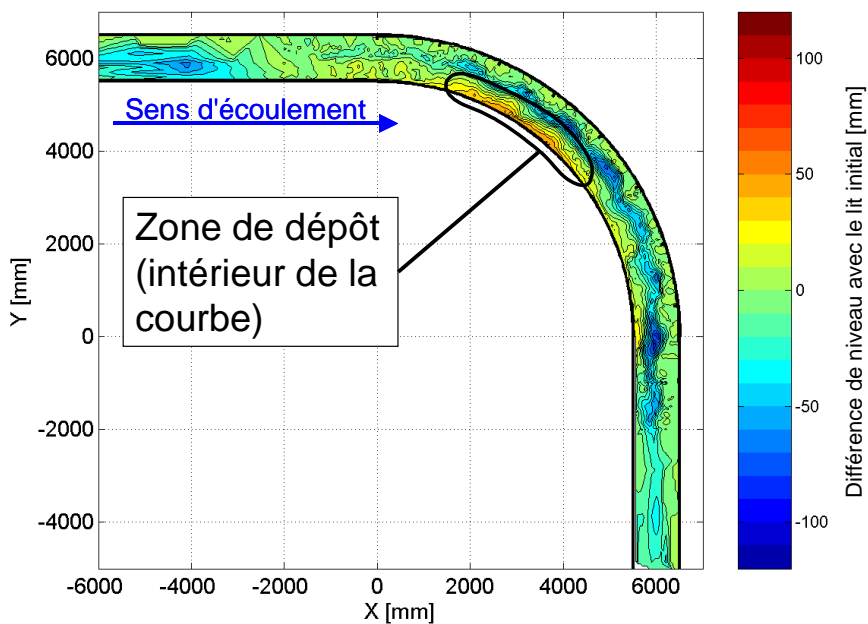


Figure 48: Essai F07c ($Q = 85$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



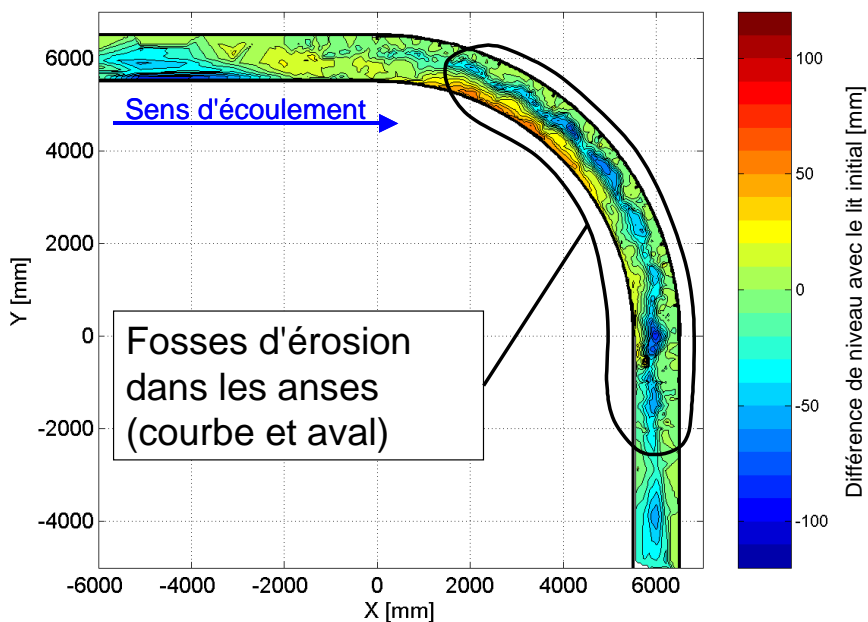
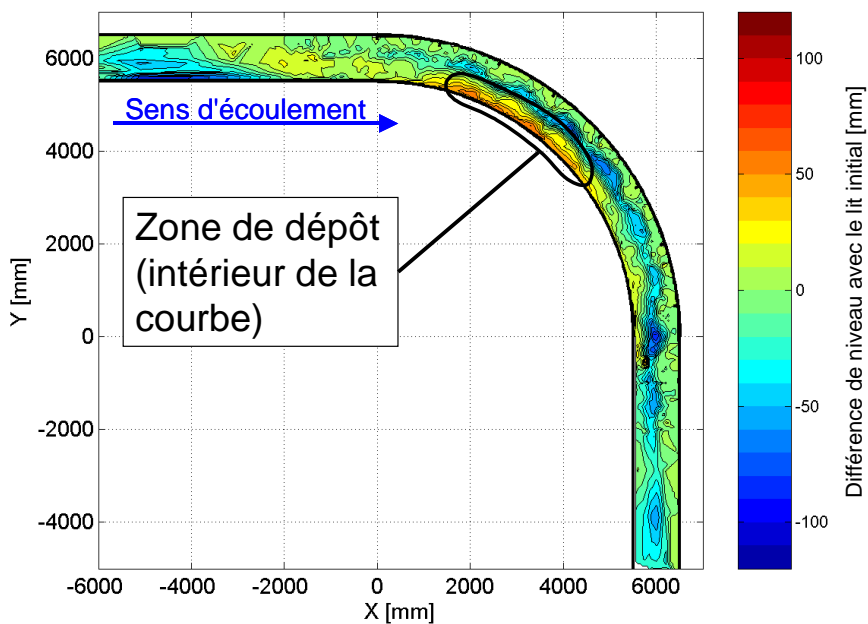


Figure 49: Essai F07d ($Q = 100$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)



6.1.2.1 Essai 7 : talus ondulé modifié, Q = 70 l/s

Annexes:

- | | |
|---|-------|
| • Photos avant, pendant et après l'essai | A3 |
| • Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit | A4 |
| • Bilan des sédiments transportés | A5 |
| • Profils en long de l'écoulement | A10.4 |

Observations:

- Comme dans le cas de la première variante d'enrochement ondulé, de multiples fosses d'érosion se sont développées (cf. Figure 47) dans les anses formées au creux des ondulations du talus, principalement dans la courbe;
- La première fosse d'érosion se forme dans la baie située dans le prolongement de la paroi intérieure amont;
- La profondeur des fosses d'érosion est maximale au centre et la sortie de la courbe;
- Une zone de dépôt s'est formée à l'intérieur de la courbe, un peu plus en amont et un peu moins étendue que dans le cas de la configuration avec un talus régulier (cf. Figure 47);
- Comme dans le cas de la première variante d'enrochement ondulé, un tri granulométrique est bien visible dans la courbe (cf. Figure 32), avec les éléments les plus fins à l'intérieur (zone de dépôt) et les plus grossiers à l'extérieur (zone de fort charriage, au pied du talus);
- Le transport solide des plus gros sédiments, le plus visible, s'est concentré essentiellement dans une bande d'environ 1/10 de largeur du canal, au pied de la pointe des enrochements;
- La résistance des enrochements a globalement été suffisante, sauf en quelques endroits, essentiellement en pointe d'ondulation. Les blocs déplacés étaient moins nombreux qu'avec la première variante de talus ondulé;
- La surface de l'écoulement est plus perturbée que dans le cas avec un talus régulier. Cela est clairement perceptible sur les photos (cf. A3.1) et mesures de niveau (cf. A4.3 et A4.4). Mais, contrairement au cas de la première variante d'enrochement, on n'observe pas de ressaut hydraulique;
- A l'extérieur de la courbe, dans les creux des ondulations, on observe une zone de recirculation très calme (en tout cas en surface), mais beaucoup plus petite qu'avec la première variante d'enrochement.

6.1.2.2 Essai 8 : talus ondulé modifié $Q = 85$ l/s

Annexes:

- | | |
|---|-------|
| • Photos avant, pendant et après l'essai | A3 |
| • Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit | A4 |
| • Bilan des sédiments transportés | A5 |
| • Profils en long de l'écoulement | A10.4 |

Les observations sont semblables à celles faites pour l'essai F07b.

Contrairement au cas de la première variante d'enrochement, il n'y a pas eu de déstabilisation importante du talus, les sollicitations de l'enrochement étaient donc cette fois-ci plus faibles.

6.1.2.3 Essai 9 : talus ondulé modifié $Q = 100$ l/s

Annexes:

- | | |
|---|-------|
| • Photos avant, pendant et après l'essai | A3 |
| • Mesures du niveau d'eau et de la topographie du lit | A4 |
| • Bilan des sédiments transportés | A5 |
| • Profils en long de l'écoulement | A10.4 |

Les observations sont semblables à celles faites pour l'essai F07c.

6.1.2.4 Analyse des résultats des essais complémentaires

a) Observations de l'écoulement

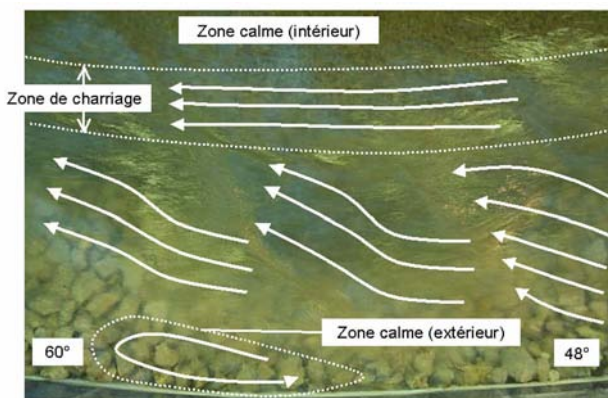


Figure 50: Vue aérienne de l'écoulement depuis la rive extérieure ($Q = 100$ l/s, position entre 48° et 60°)

La modification de l'ondulation de la ligne de pied de talus amène de grandes perturbations locales de l'écoulement, mais un peu plus faibles qu'avec la première variante de talus ondulé.

Les observations faites pendant les essais ont à nouveau permis d'identifier quatre zones principales (cf. Figure 50):

1. Une zone peu agitée à l'intérieur de la courbe, semblable à celle observée lors des deux premières séries d'essais, où transitent les éléments les plus fins du lit mobile;
2. Une bande de faible largeur en pied de talus (appelée ici zone de charriage, 1/10 de la largeur du canal), où transitent les éléments les plus grossiers du lit mobile et où le charriage est le plus facilement observable;
3. Une zone perturbée au-dessus de la pointe des ondulations et dans leur prolongement où des augmentations locales de la vitesse et de la pente de la ligne d'eau sont observées. Il n'y a pas eu d'observation de ressaut hydraulique, mais il y a toujours une sorte de jet plongeant qui aboutit dans la baie aval, puis s'oriente en direction de l'intérieur de la courbe;
4. Une zone calme avec un écoulement de recirculation lent à l'extérieur de la courbe, au centre de la baie. Par rapport à la première variante de talus ondulé, cette zone est fortement réduite.

b) Transport solide

La modification de l'ondulation de l'enrochement n'a pas eu d'influence notable sur le transport solide (cf. A5).

c) Erosion

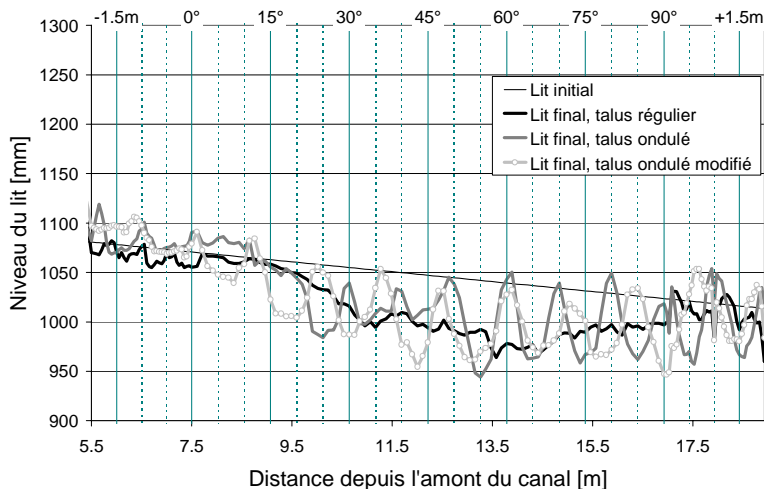


Figure 51: Comparaison des profils en long, $R = 6100 \text{ mm}$, $Q = 100 \text{ l/s}$

La modification de l'ondulation de l'enrochement n'a pas d'influence significative sur l'érosion (cf. Figure 51 et Figure 52, A10 et A11).

Il n'y a pas eu de réduction de l'érosion locale ni globale. La pente aval des ondulations est donc vraisemblablement encore trop grande dans cette variante.

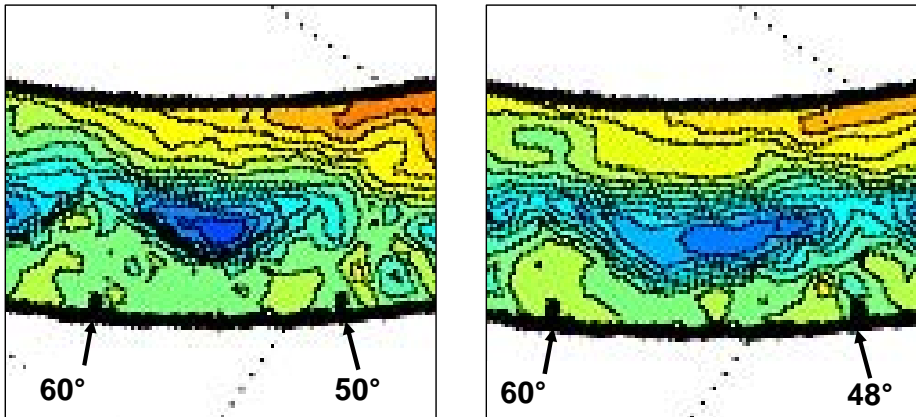


Figure 52: Comparaison des érosions mesurées pour le talus ondulé (gauche, pointes des ondulations à 50° et 60°) et le talus ondulé modifié (droite, pointes des ondulations à 48° et 60°), $Q = 100 \text{ l/s}$

d) Stabilité de l'enrochement

Avec la modification du talus ondulé, il n'y a pas eu de ressaut hydraulique observé et les problèmes de stabilité de l'enrochement ont été réduits. Le facteur de majoration de la taille des blocs $\delta = 1.4$ (cf. 5.4.2), peut donc être réduit.

La zone de recirculation (cf. Figure 51) a été fortement réduite.

6.1.2.5 Améliorations envisageables

La modification du talus ondulé proposée a amené à une meilleure stabilité de l'enrochement, mais n'a pas apporté l'amélioration escomptée du point de vue de l'érosion. La voie à suivre pour améliorer cet enrochement ondulé semble être l'accentuation de la réduction de la pente aval des ondulations.

Plutôt de continuer à chercher à agir sur les conditions d'écoulement (réduction des vitesses locales), une autre piste à explorer peut être une meilleure protection du pied de talus, par la pose de gros blocs au creux de la baie (cf. Figure 53). Cela apporterait deux avantages:

- Une réduction de l'érosion locale dans la baie;
- Une zone protégée pour la faune aquatique.

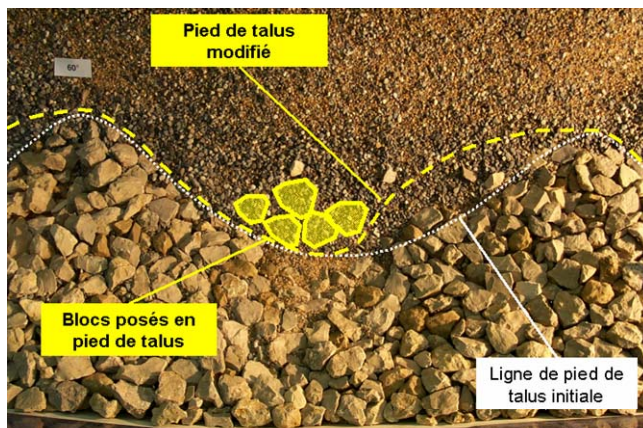


Figure 53: Proposition de talus modifié, avec gros blocs dans la baie

6.1.3 Autres essais envisageables

Des essais complémentaires ont été proposés au paragraphe 6.1.1, pour une variante de configuration avec un talus ondulé. D'autres essais ou mesures peuvent être envisagés par la suite:

- Modification de la géométrie d'ondulation:
 - Longueur d'onde plus courte, difficilement réalisable du point de vue de la mise en place des blocs;
 - Longueur d'onde plus importante;
 - Géométrie du talus différente, avec par exemple d'autres pentes maximale et minimale.
- Mesures supplémentaires pendant les essais:
 - Mesure des vitesses locales sur la pointe du talus, afin de mieux connaître les sollicitations sur les blocs d'enrochement;
 - Mesure des vitesses locales dans toute la section d'écoulement, pour mieux connaître leur répartition et mieux comprendre le phénomène de transport solide;
 - Mesure des vitesses locales tout au long de la ligne de pied de talus, afin de voir si la migration des poissons est possible.
- Modification des conditions d'essai:
 - Variation de la pente longitudinale;
 - Courbe différente (rayon, angle d'ouverture);
 - Débits d'essais supplémentaires (cf. remarque du paragraphe 5.3.2);
 - Granulométrie du talus ou du lit différente (taille des grains ou courbe granulométrique).

7. Conclusions

Les essais qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail de diplôme avaient pour but d'étudier l'influence de la géométrie d'un talus en enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe. Les configurations de talus qui ont été testées sur modèle physique permettent de constater que par rapport au talus régulier, un enrochement avec un pied de talus ondulé implique:

- Une variabilité importante des vitesses (zones calmes et zones à écoulement rapide), favorisant le déplacement des poissons;
- Des zones de recirculation à l'extérieur de la courbe, pouvant servir de refuge aux poissons lors des crues;
- Une augmentation de la capacité de transport solide de l'écoulement;
- Une rugosité globalement inchangée;
- Deux types différents d'érosions. D'une part, une érosion globale semblable à celle observée avec un talus régulier et d'autre part, des fosses d'érosion locales importantes, par endroits superposées à l'érosion globale;
- Une diversité importante des profondeurs d'érosion et de la granulométrie des dépôts, favorable aux frayères;
- Une érosion non uniforme et donc un enrochement moins menacé de déstabilisation globale;
- Une sollicitation fortement accrue des blocs d'enrochement.

Si on veut appliquer telle quelle la géométrie ondulée testée à un cas réel, ces résultats amènent aux recommandations suivantes:

- L'augmentation du transport solide est un aspect à prendre en compte;
- L'érosion locale importante dans les baies est un facteur dont il faut tenir compte pour déterminer la profondeur jusqu'à laquelle des blocs d'enrochement doivent être mis en place;
- La sollicitation accrue des blocs d'enrochement nécessite une majoration de leur diamètre sur les ondulations.

Les observations faites pendant les essais ont permis de proposer une modification de la géométrie du talus ondulé (cf. 6.1.1 "Deuxième variante de talus ondulé") qui a été testée sur le modèle physique. Son amélioration principale consiste à diminuer la pente aval des pointes d'ondulation, afin de:

- Réduire l'érosion locale;
- Limiter la superposition des érosions globale et locale;
- Réduire la sollicitation des blocs d'enrochement.

Les résultats obtenus ont montré que les modifications apportées à la géométrie de talus ondulé ont amené une diminution de la sollicitation des blocs d'enrochement, mais peu de changement quant à l'érosion locale.

Afin d'améliorer les résultats en matière d'érosion, une protection du pied de talus par des blocs disposés dans les baies est proposée. D'autres variantes de géométrie d'enrochement proposées peuvent éventuellement apporter une réduction de l'érosion locale.

Notations

Variables et constantes

A	[-]	facteur adimensionnel (formule 2.27)
B	[m]	largeur du miroir
c	[-]	facteur adimensionnel (formules 2.22 et 2.24)
d _B	[m]	diamètre des blocs d'enrochement
d _m	[m]	diamètre moyen des sédiments du lit
d _{mD}	[m]	diamètre caractéristique des grains du pavage, admis égal à d ₉₀
d ₃₀	[m]	diamètre égal à celui de 30% des sédiments du lit
d ₅₀	[m]	diamètre égal à celui de 50% des sédiments du lit
d ₉₀	[m]	diamètre égal à celui de 90% des sédiments du lit
d _*	[-]	diamètre de granulats adimensionnel
e _d	[m]	profondeur ou amplitude des macro-rugosités
e _s	[° ou m]	espacement ou longueur d'onde des macro-rugosités (également noté λ)
Fr	[-]	nombre de Froude de l'écoulement
Fr _d	[-]	nombre de Froude densimétrique
FS	[-]	facteur de sécurité de l'enrochement (formule 2.19)
g	[m/s ²]	accélération terrestre (9.81)
h _B	[m]	hauteur d'eau au-dessus des blocs (pied de talus)
h _D	[m]	hauteur d'eau à la rupture du pavage
h _m	[m]	profondeur d'eau moyenne
h _s	[m]	profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface d'eau
J	[-]	pente longitudinale
k	[-]	facteur adimensionnel (formules 2.20, 2.21, 2.22 et 2.30)
K _s	[m ^{1/3} /s]	coefficient de rugosité de Strickler
L	[m]	largeur du canal d'essai
n	[s/m ^{1/3}]	coefficient de rugosité de Manning
P	[m]	périmètre mouillé de l'écoulement
P _{aval}	[kg]	poids total des sédiments sortis du canal
q	[m ² /s]	débit liquide par mètre de largeur
q _s	[m ² /s]	débit solide par mètre de largeur
Q	[m ³ /s]	débit de l'écoulement
Q _s	[g/min]	charriage moyen pendant l'essai
R _h	[m]	rayon hydraulique de l'écoulement
R _i	[m]	rayon local
R _m	[m]	rayon moyen
s	[-]	densité relative des sédiments ($s = \rho_s / \rho$)
S	[m ²]	section de l'écoulement

S_m	[-]	facteur adimensionnel (formules 2.17, 2.18 et 2.19)
T	[h]	durée totale de l'essai
V_{amont}	[m ³]	volume total des sédiments introduits dans le canal
V_{aval}	[m ³]	volume total des sédiments sortis du canal
V_m	[m/s]	vitesse moyenne de l'écoulement
V_*	[m/s]	vitesse de cisaillement
α	[°]	angle de talus ($\tan\alpha = 1/m$)
β	[-]	angle de la pente transversale locale du lit
ΔV_{canal}	[m ³]	bilan des sédiments sur le canal (> 0 = dépôt, < 0 = érosion)
ϕ	[°]	angle de frottement des sédiments du lit
γ	[N/m ³]	poids volumique de l'eau
γ_s	[N/m ³]	poids volumique des granulats
η	[-]	facteur adimensionnel (formules 2.16 et 2.17)
φ	[°]	angle d'équilibre du talus de l'enrochement, sans écoulement
λ	[° ou m]	espacement ou longueur d'onde des macro-rugosités (également noté e_s)
ν	[m ² /s]	viscosité cinématique de l'eau
θ	[-]	contrainte de cisaillement adimensionnelle, également noté τ_*
θ_{cr}	[-]	contrainte de cisaillement adimensionnelle critique, également noté τ_{*cr}
ρ	[kg/m ³]	masse volumique de l'eau
ρ_s	[kg/m ³]	masse volumique des granulats
τ_0	[N/m ²]	contrainte de cisaillement
τ_*	[-]	contrainte de cisaillement adimensionnelle, également noté θ
τ_{*cr}	[-]	contrainte de cisaillement adimensionnelle critique
ξ	[-]	facteur adimensionnel (formules 2.17 et 2.19)

Abréviations

EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
LCH	Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL

Liste des figures

Figure 1: Essais réalisés	2
Figure 2: Configuration des essais	2
Figure 3: Ligne de pied de talus ondulée (longueur d'onde $\lambda = L$)	3
Figure 4: Périmètre mouillé de la section type modélisée	6
Figure 5: Diagramme adimensionnel de Shields-Yalin (GRAF & ALTINAKAR 1993)	7
Figure 6: Schémas en plan en coupe d'un écoulement en courbe	12
Figure 7: Paramètres des formules de calcul de la profondeur d'érosion	13
Figure 8: Installation d'essai (schéma repris partiellement de HERSBERGER 2002)	16
Figure 9: Vue partielle de l'installation	17
Figure 10: Schéma général de calcul	18
Figure 11: Courbe granulométrique du lit	20
Figure 12: Calcul de l'érosion selon Kikkawa et al., position du point d'inflexion	24
Figure 13: Calcul de l'érosion selon Kikkawa et al., bilan de l'érosion et du dépôt	24
Figure 14: Nomenclature utilisée pour la désignation des essais	28
Figure 15: Résumé des essais	29
Figure 16: Essai F01b ($Q = 70$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	30
Figure 17: Essai F01c ($Q = 85$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	31
Figure 18: Essai F01d ($Q = 100$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	32
Figure 19: Extrémité amont de la fosse d'érosion en courbe, configuration avec talus régulier	33
Figure 20: Essai F06b ($Q = 70$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	35
Figure 21: Essai F06c ($Q = 85$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	36
Figure 22: Essai F06d ($Q = 100$ l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page)	37
Figure 23: Extrémité amont de la fosse d'érosion en courbe, configuration avec talus ondulé	39
Figure 24: Vue aérienne de l'écoulement depuis la rive extérieure ($Q = 100$ l/s, position entre 50° et 60°)	40
Figure 25: Surface de l'écoulement avec un talus régulier (gauche) et avec un talus ondulé (droite), $Q = 100$ l/s	41

Figure 26: Vue aérienne du fond depuis la rive extérieure, après essai (Q = 100 l/s, position entre 50° et 60°)	41
Figure 27: Vue aérienne des sédiments depuis la rive extérieure, après essai (Q = 100 l/s, position entre 50° et 60°).....	42
Figure 28: Hauteurs d'eau moyennes amont, comparaison entre valeurs mesurées et calculées.....	43
Figure 29: Grandeurs principales de l'écoulement.....	44
Figure 30: Granulométrie de la couche de pavage après essai, talus régulier (Q=100l/s)	45
Figure 31: Essai avec talus régulier (Q = 100 l/s), tri granulométrique dans la courbe.....	45
Figure 32: Essai avec talus ondulé (Q = 100 l/s), tri granulométrique dans la courbe.....	46
Figure 33: Relation entre débits liquide et solide	48
Figure 34: Comparaison des érosions mesurées pour le talus régulier (gauche) et le talus ondulé (droite), Q = 100 l/s (trait discontinu = pied de talus)	49
Figure 35: Axes des profils en long, pour un talus régulier (haut de la page) et un talus ondulé (bas de la page)	50
Figure 36: Comparaison des profils en long, R = 6100 mm, Q = 100 l/s (ligne discontinue = lit final lissé, talus ondulé)	51
Figure 37: Comparaison de profils en travers, Q = 85 l/s.....	52
Figure 38: Erosion locale au pied du talus ondulé, vue depuis l'aval	52
Figure 39: Superposition des zones d'érosion globale et locale.....	53
Figure 40: Comparaison des variations du lit, R = 6100 mm, Q = 100 l/s	54
Figure 41: Modification du niveau moyen du lit dans la zone d'érosion principale	55
Figure 42: Comparaison des profondeurs maximales d'affouillement, sections en pointe d'ondulation, Q = 100 l/s	56
Figure 43: Variation longitudinale de la pente de la surface d'eau, R = 6100 mm, Q = 100 l/s	58
Figure 44: Première proposition de talus modifié.....	60
Figure 45: Deuxième proposition de talus modifié	61
Figure 46: Troisième proposition de talus modifié.....	61
Figure 47: Essai F07b (Q = 70 l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page).....	63
Figure 48: Essai F07c (Q = 85 l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page).....	64
Figure 49: Essai F07d (Q = 100 l/s), zones d'érosion (haut de la page) et de dépôt (bas de la page).....	65
Figure 50: Vue aérienne de l'écoulement depuis la rive extérieure (Q = 100l/s, position entre 48° et 60°).....	67
Figure 51: Comparaison des profils en long, R = 6100 mm, Q = 100 l/s.....	68

Figure 52: Comparaison des érosions mesurées pour le talus ondulé (gauche, pointe des ondulations à 50° et 60°) et le talus ondulé modifié (droite, pointes des ondulations à 48° et 60°), Q =100 l/s 69

Figure 53: Proposition de talus modifié, avec gros blocs dans la baie 70

Références

- Günter, A.:** *Die kritische mittlere Sohlschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung des Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlschubspannungsschwankungen*; Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ); Nr. 3, Zürich, 1971.
- Graf, W.H.; Altinakar, M.S.:** *Hydraulique fluviale, Tome 1, Ecoulement permanent uniforme et non uniforme*; Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Volume 16, Lausanne, 1993
- Hersberger, D.:** *Wall Roughness Effects on Flow and Scouring in Curved Channels with Gravel Bed*; Thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Thèse N°2632, Lausanne, 2002
- Hersberger, D.:** *Wall roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel bed*; Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); N° 14, Lausanne, 2003.
- Kikkawa H., Ikeda S., Kitagawa A.:** *Flow and Bed Topography in Curved Open Channels*; Journal of the Hydraulics Division, Vol. 102, No. HY9, pp. 1327-1342, sept. 1976.
- Peter W.:** *Kurvenkolk / Untersuchungen über die Sohlensausbildung in Flusskrümmungen*; Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ); Nr. 85, Zürich, 1986.
- Schleiss, A:** *Aménagement de cours d'eau*; Support de cours des 3^e et 4^e années de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Lausanne, décembre 2001
- Smart, G.M.; Jaeggi, M.N.R.:** *Sedimenttransport in steilen Gerinnen / Sediment transport on Steep Slope*; Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ); Nr. 64, Zürich, 1983.
- Stevens M.A., Simons D.B., Lewis G.L.:** *Safety factors for riprap protection*; Journal of the Hydraulics Division, Vol. 102, No. HY5, pp. 637-655, mai 1976.

Remerciements

- Prof. Dr A. Schleiss: Responsable du suivi de ce travail de diplôme
- Dr. J.-L. Boillat: Représentant de la direction du cycle postgrade
- Dr. D. Hersberger: Expert externe, aide technique pour l'utilisation de l'installation d'essais physiques, aide technique pour le traitement des mesures
- L. Schneiter, M.-E. Pantillon: Aide technique pour l'utilisation des installations de la halle d'hydraulique du LCH
- M. Guillod, A. Junod, M. Mangin, P.-Y. Pitteloud, M. Andaroodi: Aide pour les essais sur modèle physique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A1:	CALCULS PRÉLIMINAIRES	83
ANNEXE A1.1:	GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS DU LIT	84
ANNEXE A1.2:	CALCULS HYDRAULIQUES DE BASE	85
ANNEXE A1.3:	CHARRIAGE DES GRANULATS DU LIT, CONTRÔLE SELON SHIELDS-YALIN (1)	86
ANNEXE A1.4:	CHARRIAGE DES GRANULATS DU LIT, CONTRÔLE SELON SHIELDS-YALIN (2)	87
ANNEXE A1.5:	DÉTERMINATION DU TRANSPORT SOLIDE SELON SMART & JAEGGI (1983)	88
ANNEXE A1.6:	CALCUL DE LA HAUTEUR D'EAU ROMPANT LE PAVAGE, SELON GÜNTER (1971)	89
ANNEXE A1.7:	CALCUL DU DÉBIT ROMPANT LE PAVAGE, SELON GÜNTER (1971)	90
ANNEXE A1.8:	VÉRIFICATION DE STABILITÉ DU TALUS SELON STEVENS ET AL. (1976) (1)	91
ANNEXE A1.9:	VÉRIFICATION DE STABILITÉ DU TALUS SELON STEVENS ET AL. (1976) (2)	92
ANNEXE A1.10:	RÉSUMÉ DES CALCULS DE CHARRIAGE ET DE STABILITÉ DE TALUS	93
ANNEXE A1.11:	ESTIMATION DE LA PROFONDEUR D'ÉROSION, SELON KIKKAWA ET AL. (1976)	94
ANNEXE A2:	PRÉPARATIFS ET DÉROULEMENT DES ESSAIS	95
ANNEXE A2.1:	DÉROULEMENT DES ESSAIS	96
ANNEXE A2.2:	PRÉPARATION DES ESSAIS, CONFIGURATION INITIALE	98
ANNEXE A2.3:	PRÉPARATION DES ESSAIS, CHANGEMENT DE CONFIGURATION	99
ANNEXE A3:	PHOTOS AVANT, PENDANT ET APRÈS LES ESSAIS	101
ANNEXE A3.1:	SURFACE DE L'ÉCOULEMENT	102
ANNEXE A3.2:	VUES GÉNÉRALES DU FOND DEPUIS L'AMONT DE LA COURBE APRÈS ESSAI	104
ANNEXE A3.3:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AMONT DE LA COURBE, TALUS RÉGULIER	108
ANNEXE A3.4:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AVAL DE LA COURBE, TALUS RÉGULIER	109
ANNEXE A3.5:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AMONT DE LA COURBE, TALUS ONDULÉ	110
ANNEXE A3.6:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AVAL DE LA COURBE, TALUS ONDULÉ	111
ANNEXE A3.7:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AMONT DE LA COURBE, TALUS ONDULÉ MODIFIÉ	112
ANNEXE A3.8:	VUES DEPUIS L'EXTRÉMITÉ AVAL DE LA COURBE, TALUS ONDULÉ MODIFIÉ	113
ANNEXE A4:	TRAITEMENT DES MESURES DE NIVEAU	115
ANNEXE A4.1:	MESURE DE LA TOPOGRAPHIE DU FOND	116
ANNEXE A4.2:	DIFFÉRENCES DE NIVEAU DU FOND PAR RAPPORT AU FOND INITIAL	118
ANNEXE A4.3:	MESURE DE LA SURFACE D'EAU	120
ANNEXE A4.4:	DIFFÉRENCES DE NIVEAU D'EAU PAR RAPPORT AU NIVEAU D'EAU MOYEN	122
ANNEXE A5:	TRANSPORT DE SÉDIMENTS	125
ANNEXE A5.1:	ALIMENTATION EN SÉDIMENTS ET ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS À LA SORTIE	126
ANNEXE A5.2:	ALIMENTATION EN SÉDIMENTS CUMULÉE	128
ANNEXE A6:	GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS	131
ANNEXE A6.1:	GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS À LA SORTIE DU MODÈLE	132
ANNEXE A6.2:	ÉROSION ET TRI GRANULOMÉTRIQUE DANS LA COURBE, $Q = 70 \text{ L/S}$	133
ANNEXE A6.3:	ÉROSION ET TRI GRANULOMÉTRIQUE DANS LA COURBE, $Q = 85 \text{ L/S}$	137
ANNEXE A6.4:	ÉROSION ET TRI GRANULOMÉTRIQUE DANS LA COURBE, $Q = 100 \text{ L/S}$	141
ANNEXE A6.5:	GRANULOMÉTRIE DE LA COUCHE DE PAVAGE, APRÈS ESSAIS, $Q = 100 \text{ L/S}$	145

ANNEXE A7:	PROFILS EN TRAVERS	147
ANNEXE A7.1:	PROFILS EN TRAVERS, Q = 70 L/S	148
ANNEXE A7.2:	PROFILS EN TRAVERS, Q = 85 L/S	155
ANNEXE A7.3:	PROFILS EN TRAVERS, Q = 100 L/S	162
ANNEXE A8:	COMPARAISON DES PROFILS EN TRAVERS	169
ANNEXE A8.1:	COMPARAISON DES PROFILS EN TRAVERS, Q = 70 L/S	170
ANNEXE A8.2:	COMPARAISON DES PROFILS EN TRAVERS, Q = 85 L/S	175
ANNEXE A8.3:	COMPARAISON DES PROFILS EN TRAVERS, Q = 100 L/S	180
ANNEXE A9:	NIVEAUX D'EAU	185
ANNEXE A9.1:	COMPARAISON DES NIVEAUX D'EAU MOYENS, VALEURS ABSOLUES	186
ANNEXE A9.2:	COMPARAISON DES NIVEAUX D'EAU MOYENS, VALEURS RELATIVES	187
ANNEXE A9.3:	PENTE LONGITUDINALE DE LA SURFACE D'EAU, R = 6100 MM	188
ANNEXE A10:	PROFILS EN LONG, RAYON VARIABLE	191
ANNEXE A10.1:	PROFILS EN LONG, R = 5800 MM (R = 6000 MM À L'AXE)	192
ANNEXE A10.2:	PROFILS EN LONG, R = 5900 MM (R = 6000 MM À L'AXE)	193
ANNEXE A10.3:	PROFILS EN LONG, R = 6000 MM (AXE DU CANAL)	194
ANNEXE A10.4:	PROFILS EN LONG, R = 6100 MM (R = 6000 MM À L'AXE)	195
ANNEXE A10.5:	PROFILS EN LONG, R VARIABLE	197
ANNEXE A11:	PROFILS EN LONG ET ÉROSION, RAYON R = 6100 MM	199
ANNEXE A11.1:	COMPARAISON DES PROFILS EN LONG, R = 6100 MM (R = 6000 MM À L'AXE)	200
ANNEXE A11.2:	COMPARAISON DES PROFONDEURS D'ÉROSION, R = 6100 MM (1) (R = 6000 MM À L'AXE)	201
ANNEXE A11.3:	COMPARAISON DES PROFONDEURS D'ÉROSION, R = 6100 MM (2) (R = 6000 MM À L'AXE)	202
ANNEXE A11.4:	COMPARAISON DES PROFONDEURS D'ÉROSION, R = 6100 MM (3) (R = 6000 MM À L'AXE)	203
ANNEXE A12:	PROFILS EN TRAVERS, AVEC ÉROSION SELON KIKKAWA	205
ANNEXE A12.1:	PROFILS EN TRAVERS, AVEC ÉROSION SELON KIKKAWA, Q = 70 L/S	206
ANNEXE A12.2:	PROFILS EN TRAVERS, AVEC ÉROSION SELON KIKKAWA, Q = 85 L/S	213
ANNEXE A12.3:	PROFILS EN TRAVERS, AVEC ÉROSION SELON KIKKAWA, Q = 100 L/S	220
ANNEXE A13:	COMPARAISON ENTRE ÉROSION CALCULÉE ET MESURÉE	227
ANNEXE A13.1:	COMPARAISON DES PROFONDEURS D'AFFOUILLEMENT ($H_s - H_M$)	228
ANNEXE A13.2:	COMPARAISON, EN VALEUR ABSOLUE, ENTRE PROFONDEURS D'ÉROSION (H_s) MESURÉE ET CALCULÉE	229
ANNEXE A13.3:	COMPARAISON, EN VALEUR RELATIVE, ENTRE PROFONDEURS D'ÉROSION (H_s) MESURÉE ET CALCULÉE	230
ANNEXE A14:	BILAN VOLUMIQUE DANS LA ZONE PRINCIPALE D'ÉROSION	231
ANNEXE A14.1:	MESURE DE LA TOPOGRAPHIE DU FOND	232
ANNEXE A14.2:	DIFFÉRENCES DE NIVEAU DU FOND PAR RAPPORT AU FOND INITIAL	234
ANNEXE A15:	DIMENSIONNEMENT CORRIGÉ DES ENROCHEMENTS	237
ANNEXE A15.1:	FACTEUR CORRECTIF DE LA PENTE LONGITUDINALE	238
ANNEXE A15.2:	FACTEUR CORRECTIF DU DIAMÈTRE DES BLOCS	241

Annexe A1: Calculs préliminaires

Annexe A1.1:	Granulométrie des sédiments du lit
Annexe A1.2:	Calculs hydrauliques de base
Annexe A1.3:	Charriage des granulats du lit, contrôle selon Shields-Yalin (1)
Annexe A1.4:	Charriage des granulats du lit, contrôle selon Shields-Yalin (2)
Annexe A1.5:	Détermination du transport solide selon Smart & Jaeggi (1983)
Annexe A1.6:	Calcul de la hauteur d'eau rompant le pavage, selon Günter (1971)
Annexe A1.7:	Calcul du débit rompant le pavage, selon Günter (1971)
Annexe A1.8:	Vérification de la stabilité du talus selon Stevens et al. (1976) (1)
Annexe A1.9:	Vérification de la stabilité du talus selon Stevens et al. (1976) (2)
Annexe A1.10:	Résumé des calculs de charriage et de stabilité de talus
Annexe A1.11:	Estimation de la profondeur d'érosion, selon Kikkawa et al. (1976)

Annexe A1.1: Granulométrie des sédiments du lit

Classement par diamètre

Diamètre [mm]	Poids cumulé [%]	Poids non cumulé [%]	Diamètre pondéré [mm]
16.000	99.9	5.4	0.65
8.000	94.4	10.8	0.77
6.250	83.7	10.3	0.58
5.000	73.3	14.5	0.65
4.000	58.8	36.2	1.29
3.150	22.7	19.3	0.55
2.500	3.3	3.1	0.07
2.000	0.0	0.3	0.00
1.000	0.0	0.0	0.00
0.500	0.0	0.0	0.00
dm			4.6

Classement par fraction pondérale

	N° ligne	Diamètre [mm]	Poids cumulé [%]
d5	3	2.5	5
d10	3	2.7	10
d15	3	2.9	15
d20	3	3.1	20
d25	4	3.2	25
d30	4	3.3	30
d35	4	3.4	35
d40	4	3.5	40
d45	4	3.7	45
d50	4	3.8	50
d55	4	3.9	55
d60	5	4.1	60
d65	5	4.4	65
d70	5	4.7	70
d75	6	5.2	75
d80	6	5.8	80
d85	7	6.4	85
d90	7	7.2	90
d95	8	8.6	95

d90/d30	2.19
(d90/d30) ^{0.2}	1.17

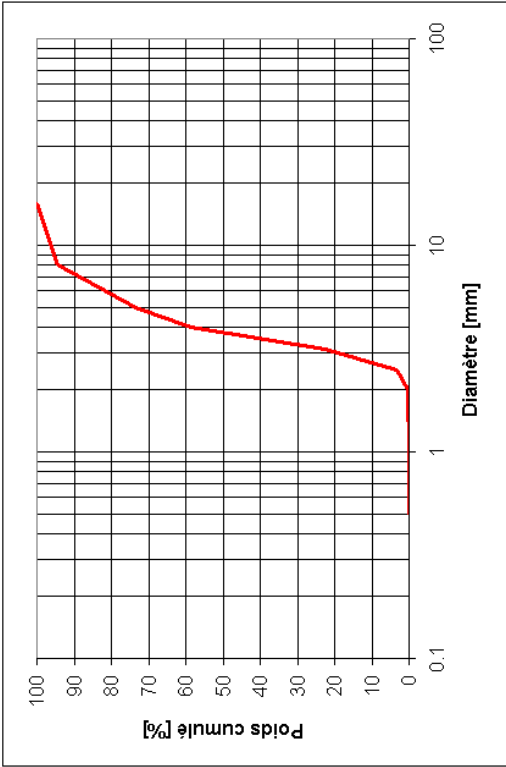
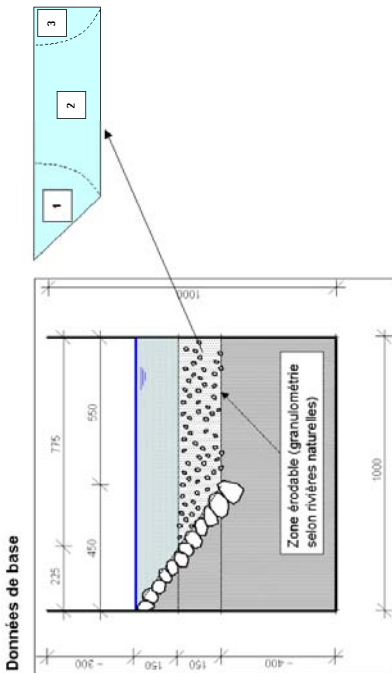


Tableau 1: Granulométrie des sédiments du lit

Calculs hydrauliques préliminaires



$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (p_i \cdot n_i^{3/2})}{P} \right]^{2/3}$$

$$Q = K \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot J_f^{1/2}$$

Rugosité composée:

Equ. de Manning-Strickler.

Largeur canal	Hauteur d'eau	Pente talus moyenne	Pente talus max.	Largeur lit	Surf mouillée
l	h	1/m _{mo}	1/m _{max}	b	S
[m]	[m]	[$\frac{1}{\text{m}}$]	[$\frac{1}{\text{m}}$]	[m]	[m ²]
1,000	0,150	2/3	2/3	0,775	0,133

Largeur canal	Hauteur talus h_{max}	Pente talus moyenne $1/f_{\text{moy}}$	Largeur lit b	Hauteur d'eau h	Largeur miroir B
[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]
1,000	0,150	2/3	0,775	0,150	1,000

Granulométrie du talus (blocs):	d_0	[mm]	64
Rugosité du talus:	$K_1 = 21.1 \times d_0^{-1.06}$	[m ^{1/3} s ⁻¹]	33.4
Angle de talus des blocs:	ϕ	[°]	40

Granulométrie du lit:	d_m	[mm]	4.6
	d_{50}	[mm]	3.3
	d_{90}	[mm]	3.8
	d_{95}	[mm]	7.2

Rugosité du lit:	$k_s = 21.1 \times d_{50}^{0.6}$	[m s ⁻¹]	53.5
	$k_s = 26.1 \times d_{50}^{0.6}$	[m s ⁻¹]	59.4
	$k_s = (k_s + k_{s'})/2$	[m s ⁻¹]	56.4

	P	Pén. mouillée	Rug. Strickl.	Ks (m ¹⁰ s ⁻¹)	n	P x 10 ³² [m ¹⁰ s ⁻³²]
Section 1	0.270			33.4	0.030	0.00140
Section 2	0.775			56.4	0.018	0.00183
Section 3 (PVC)	0.150			100	0.010	0.00015
Total	1.195			50.0	0.020	0.00388

Rayon hydraulique:	$R_h = S / P$	(m)	0.111
--------------------	---------------	-----	--------------

Smart Jaeggi Rug. Strékl. $K = K_3$ [m ¹⁰ .s ⁻¹]	Surf. mouillée		Rayon hydr.	Pente	Débit	
	S [m ²]	R _b [m]	J _r [%]	Q [m ³ /s]	[l/s]	
50,0	0,133	0,111	0,500	0,109	108 q	

Tableau 2: Calculs hydrauliques préliminaires

Calculs hydrauliques préliminaires

Diamètre des granulats charriés, selon Shields-Yalin

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

avec :

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Contrainte de cisaillement adimensionnelle τ_*

$$\tau_* = \frac{\tau_{0\alpha}}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_m}$$

Diamètre de granulat adimensionnel

$$d_* = d_m \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

Détermination de la pente critique pour τ_0 et R_h donnés

$$J_{fr} = \frac{\tau_{0\alpha}}{\gamma \cdot R_h}$$

Q	d _m	d _u (V _{aim})	τ_{scr}	τ_{0scr}	R _h	J _{scr}	J _f	Mouvement des sédiments du lit
[l/s]	[m]	[-]	[-]	[N/m ²]	[m]	[%]	[%]	
108.9	0.0046	116	0.047	3.51	0.111	0.321	0.500	CHARRIAGE

avec : $\gamma = \rho \cdot g$ Contrainte de cisaillement adimensionnelle τ_*
$$\tau_* = \frac{\tau_{0\sigma}}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_m}$$

Diamètre de granulat adimensionnel

$$d_* = d_m \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$
Détermination de la pente critique pour τ_0 et R_h donnés
$$J_{for} = \frac{\tau_{0\sigma}}{\gamma \cdot R_h}$$

Q	d _m	d _* (Yalin)	τ_{*cr}	τ_{0cr}	R _h	J _{for}	J _f	Mouvement des sédiments du lit
108.9	[m]	[-]	[-]	[N/m²]	[m]	[%]	[%]	CHARRIAGE
	0.0046	116	0.047	3.51	0.111	0.321	0.500	

Tableau 3: Calculs hydrauliques préliminaires

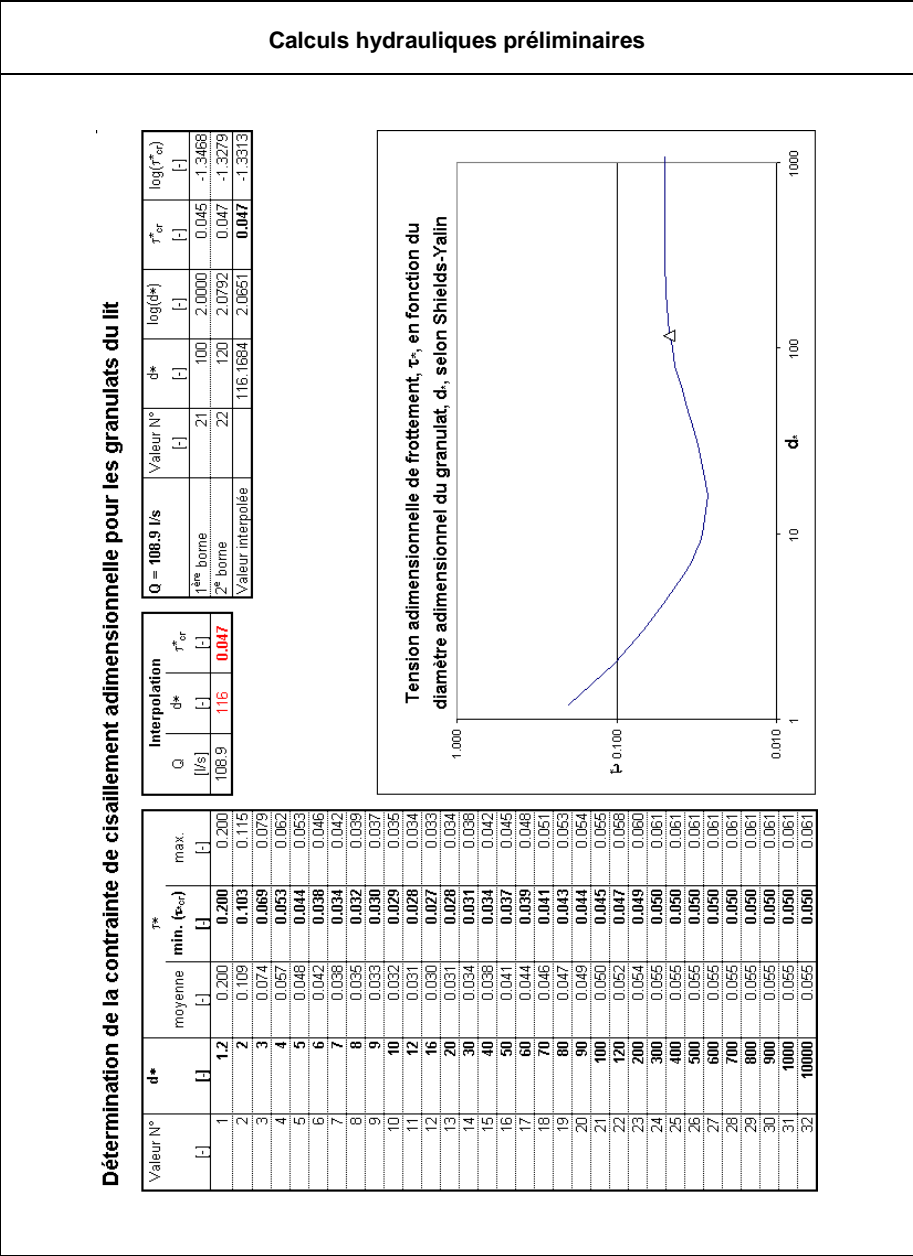


Tableau 4: Calculs hydrauliques préliminaires

Calculs hydrauliques préliminaires													
Détermination du transport solide : formule de Smart & Jaeggi (1983)													
$q_s = \frac{4}{(s - 1)} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \cdot q \cdot J_f^{1.6} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{wcr}}{y_m \cdot J} \right) \cdot d_m$													
Q	S	B	b	B _{may} = (B + b) / 2	q = Q / B _{may}	y _m = S / B _{may}	d _m	d ₃₀	d ₉₀	J _f	τ _{wcr}	q _s	Q _s = q _s x b
[l/s]	[m²]	[m]	[m]	[m]	[l/ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[-]	[l/ms]	[l/s]
108.9	0.13	1.00	0.78	0.89	122.7	0.150	0.0046	0.0033	0.0072	0.500	0.047	37.2E-3	28.8E-3
													4636

Tableau 5: Calculs hydrauliques préliminaires

Annexe A1.6: Calcul de la hauteur d'eau rompant le pavage, selon Günter (1971)

Calculs hydrauliques préliminaires

Calcul de la hauteur d'eau rompant la couche de pavage selon Günter (1971)

$$h_D = \frac{0.05 \cdot (s - 1) \cdot d_m}{J} \left(\frac{d_{mD}}{d_m} \right)^{2/3}$$

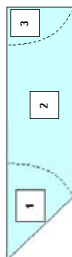
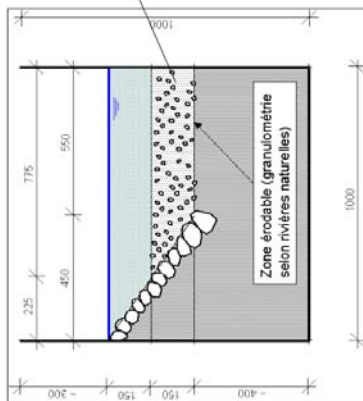
Géométrie de la section

Densité relative (s-1)	Diamètre des grains		Pente lit J [%]	Hauteur d'eau	
	d _m [mm]	d _{mD} [mm]		[mm]	[m]
1.65	4.6	7.2	0.5	102.3	0.102

Admis: d_{mD} = d₉₀ du lit

Tableau 6: Calculs hydrauliques préliminaires

Données de base



Largeur canal	Hauteur d'eau	Pente talus moyenne	Pente talus max.	Largeur lit	Surf mouillée
l	h	$1/m_{\text{moy}}$	$1/m_{\text{max}}$	b	S
[m]	[m]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	[m]	[m ²]
1,000	0,102	2/3	2/3	0,775	0,087

Largeur canal	Hauteur talus h_{talus}	Pente talus moyenne $1/\text{mcoy}$	Largeur lit b	Hauteur d'eau h	Largeur miroir B
1 000	0.150	2/3	0.775	0.102	0.928

Granulométrie du talus (blocs):	d_{θ}	[mm]	64
Rugosité du talus:	$K_1 = 21.1 \times d_{\theta}^{-1.0}$	$[m^{-1/3} s^{-1}]$	33.4
Angle de talus des blocs:	ϕ	[°]	40

Granulométrie du lit	d_m	[mm]	4.6
	d_{50}	[mm]	3.3
	d_{60}	[mm]	3.8
	d_{80}	[mm]	7.2

Requisits du lit	$K_D = 21.1 \times d_{50}^{-1.0}$	[m ³ s ⁻¹]	53.5
	$K_D = 26.1 \times d_{50}^{-1.0}$	[m ³ s ⁻¹]	59.4
	$K_D = [6 \times K_D + K_D^2]^{0.7}$	[m ³ s ⁻¹]	56.4

	P	Rug. mouillée	Rug. Strickl.	n	P χ^{32}
	[m]		[m s ⁻¹]	[m ² s ⁻²]	
Section 1	0.184		33.4	0.030	0.00096
Section 2	0.775		56.4	0.018	0.00183
Section 3 (PVC)	0.102		100	0.010	0.00010
Total	1.067		51.3	0.019	0.007289

Rayon hydraulique:	$R_h = S / P$	[m]	0.082
--------------------	---------------	-----	-------

Rug. Strickl. $K = K_s$ [m ² s ⁻¹]	Surf. mouillée S [m ²]	Rayon hydr. R_h [m]	Pente J_r [%]	Debit Q [m ³ /s]	$ V_s $ [m/s]
	0,067	0,082	0,50%	0,060	59,7

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i \cdot n_i^{3/2})}{P} \right]^{2/3}$$

$$Q = K \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

Rugosity composite:

Equ. de Manning-Strickler.

Tableau 7: Calculs hydrauliques préliminaires

Annexe A1.8: Vérification de stabilité du talus selon Stevens et al. (1976) (1)

Calculs hydrauliques préliminaires

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al. (1976)

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

$$S_m = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

$$\xi = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi^2 + 4} - \xi \right)$$

Angle de talus:	α	33.7°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

ρ	1000	kg/m³
ρ_s	2680	kg/m³
g	9.81	m/s²
ν	1.0E-6	m²/s

Q	d _B	d _* (Y _{alm})	τ_{acr}	h	J _r	γ	S _m	ξ	S
[l/s]	[m]	[.]	[.]	[m]	[%]	[.]	[.]	[.]	[.]
108.9	0.0640	1629	0.050	0.150	0.500	0.1074	1.2586	0.1625	1.16

Tableau 8: Calculs hydrauliques préliminaires

Calculs hydrauliques préliminaires

Détermination de la contrainte de cisaillement adimensionnelle pour les blocs de l'enrochement

Q = 108.9 l/s		Valeur N°	d*	log(d*)	τ^*	log(τ^*)
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1 ^{ère} borne		31	1000	3.0000	0.050	-1.3010
2 ^e borne		32	10000	4.0000	0.050	-1.3010
Valeur interpolée			1628.694	3.2118	0.050	-1.3010

Interpolation		d*	τ^*
		[-]	[-]
Q			
l/s			
108.9		1629	0.050

Valeur N°	d*	τ^*		max.
		moyenne	min. (τ_{cr})	
1	1.2	0.200	0.200	0.200
2	2	0.109	0.103	0.115
3	3	0.074	0.069	0.079
4	4	0.057	0.053	0.062
5	5	0.048	0.044	0.053
6	6	0.042	0.038	0.046
7	7	0.038	0.034	0.042
8	8	0.035	0.032	0.039
9	9	0.033	0.030	0.037
10	10	0.032	0.029	0.036
11	12	0.031	0.028	0.034
12	16	0.030	0.027	0.033
13	20	0.031	0.028	0.034
14	30	0.034	0.031	0.038
15	40	0.038	0.034	0.042
16	50	0.041	0.037	0.045
17	60	0.044	0.039	0.048
18	70	0.046	0.041	0.051
19	80	0.047	0.043	0.053
20	90	0.049	0.044	0.054
21	100	0.050	0.045	0.055
22	120	0.052	0.047	0.058
23	200	0.054	0.049	0.060
24	300	0.055	0.050	0.061
25	400	0.055	0.050	0.061
26	500	0.055	0.050	0.061
27	600	0.055	0.050	0.061
28	700	0.055	0.050	0.061
29	800	0.055	0.050	0.061
30	900	0.055	0.050	0.061
31	1000	0.055	0.050	0.061
32	10000	0.055	0.050	0.061

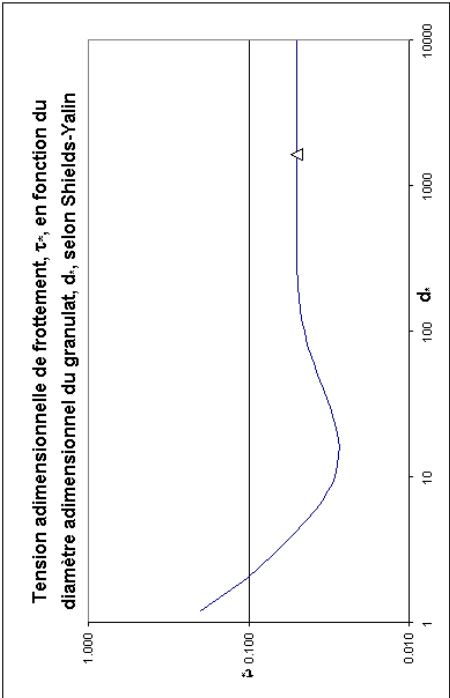


Tableau 9: Calculs hydrauliques préliminaires

Calculs hydrauliques préliminaires

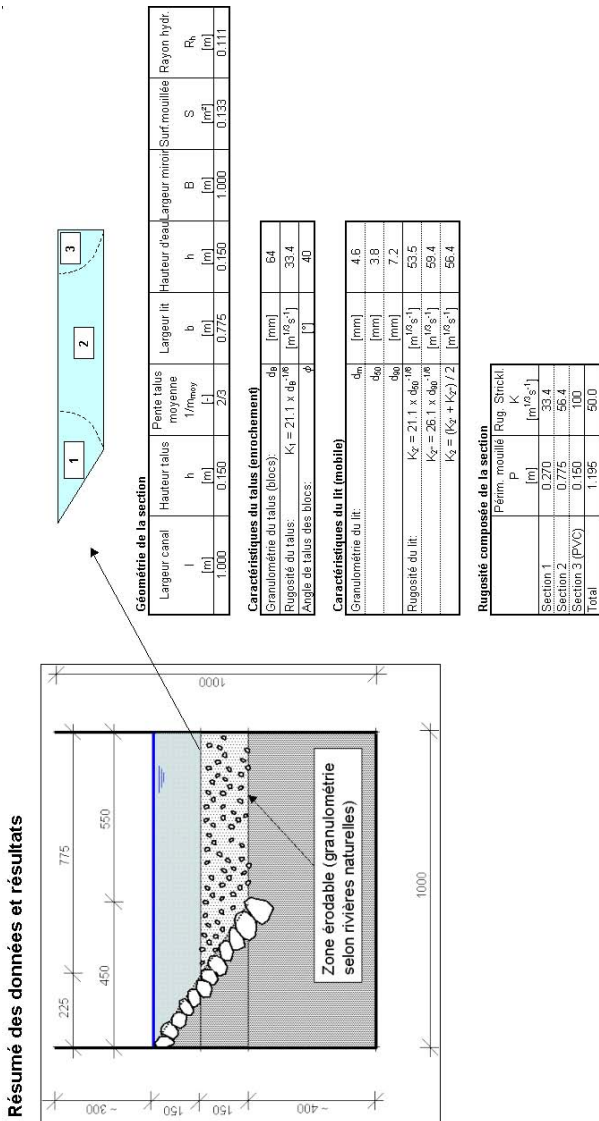


Tableau 10: Calculs hydrauliques préliminaires

Calculs hydrauliques préliminaires

$$\mathbf{h}_s = \mathbf{h}_m \cdot \left(\frac{\mathbf{R}_i}{\mathbf{R}_m} \right)^k$$

$$k = (2.575 \cdot c - 4.078) \cdot \sqrt{\theta}$$

$$V_* = \sqrt{g \cdot h_m \cdot J}$$

- 94 -

Annexe A2: Préparatifs et déroulement des essais

Annexe A2.1: Déroulement des essais

Annexe A2.2: Préparation des essais, configuration initiale

Annexe A2.3: Préparation des essais, changement de configuration

Annexe A2.1: Déroulement des essais

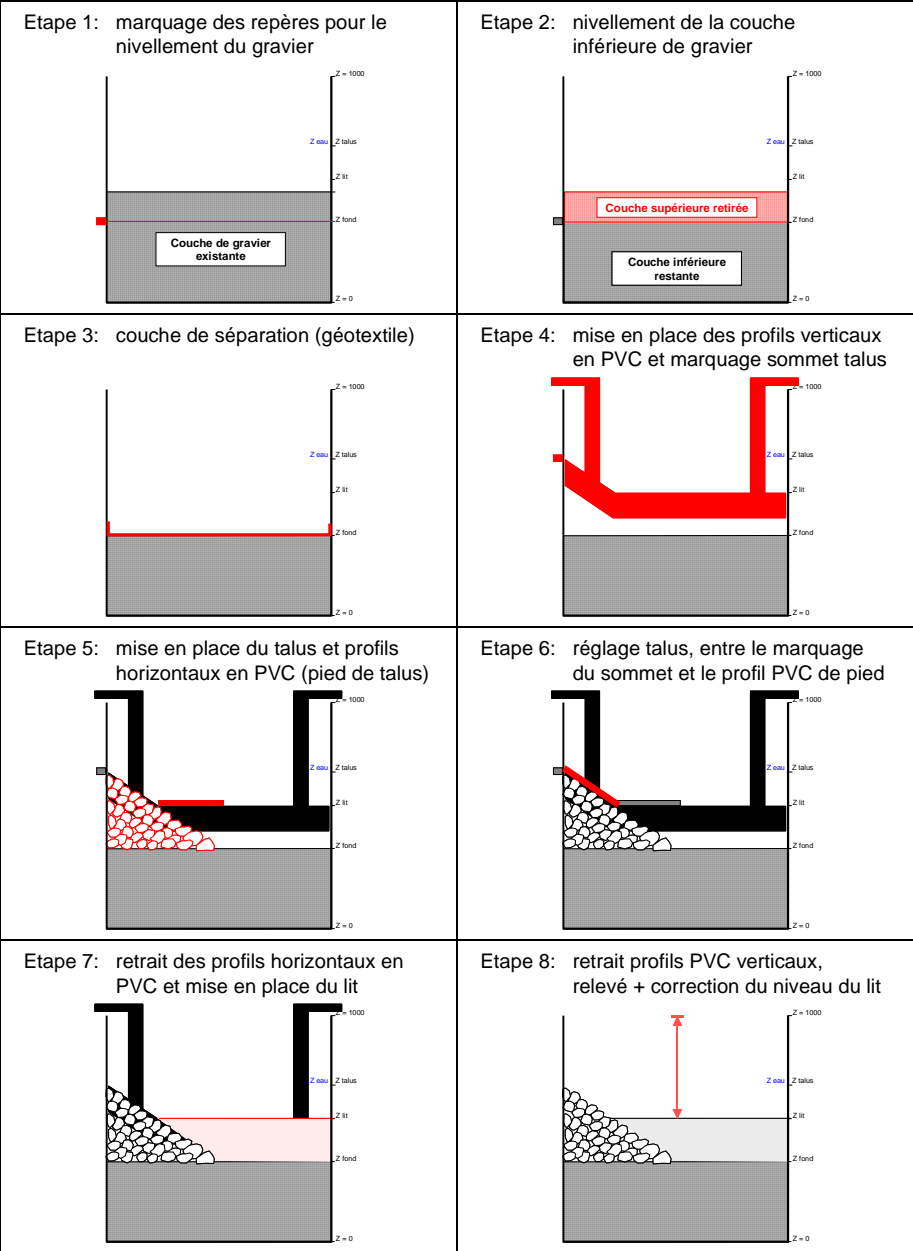


Tableau 12: Déroulement des essais

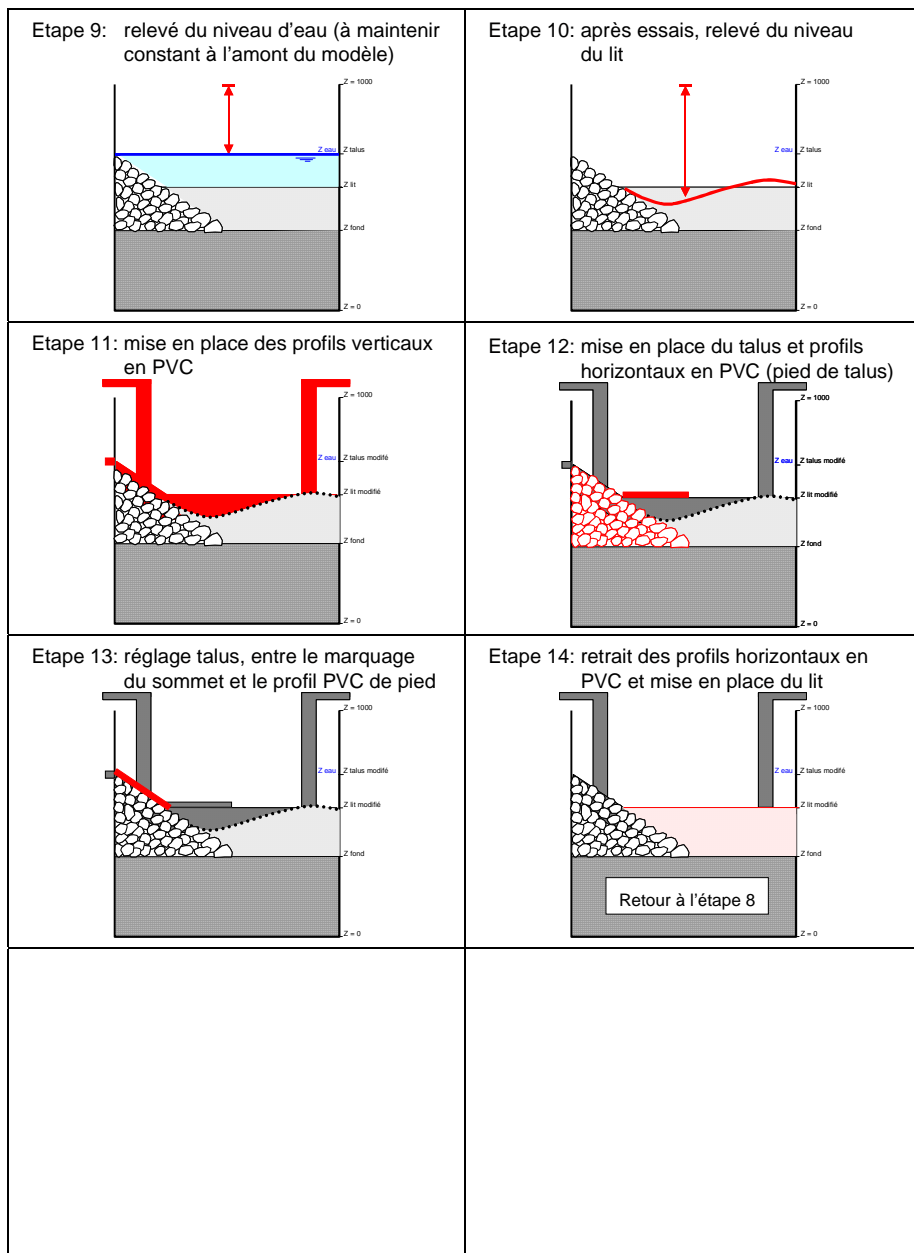


Tableau 13: Déroulement des essais

Annexe A2.2: Préparation des essais, configuration initiale

 <p>Etat initial du canal</p>	 <p>Gravier enlevé, géotextile posé</p>
 <p>Marquage du pied de talus</p>	 <p>Remplissage du talus</p>
 <p>Talus en place</p>	 <p>Lit en place</p>

Tableau 14: Préparation des essais, configuration initiale

Annexe A2.3: Préparation des essais, changement de configuration

	
Retrait de la couche supérieure de gravier du talus et dégagement du lit	Mise en place du nouveau pied de talus
	
Remise en place de la couche supérieure de gravier du talus	Remise en place du lit

Tableau 15: Préparation des essais, changement de configuration

Annexe A3: Photos avant, pendant et après les essais

Annexe A3.1:	Surface de l'écoulement
Annexe A3.2:	Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai
Annexe A3.3:	Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus régulier
Annexe A3.4:	Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus régulier
Annexe A3.5:	Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé
Annexe A3.6:	Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé
Annexe A3.7:	Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé modifié
Annexe A3.8:	Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé modifié

Annexe A3.1: Surface de l'écoulement



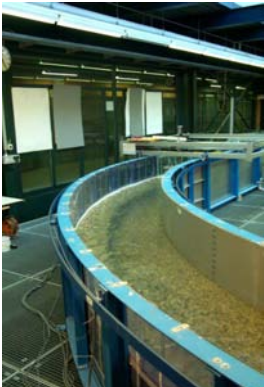
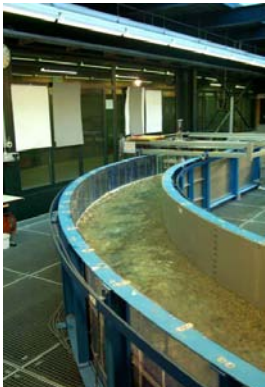


Q [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé
70		
85		
100		

Tableau 16: Surface de l'écoulement


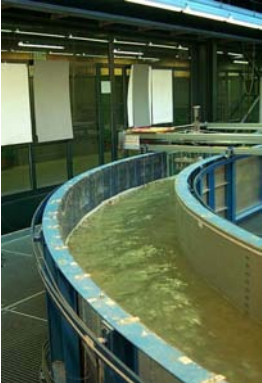
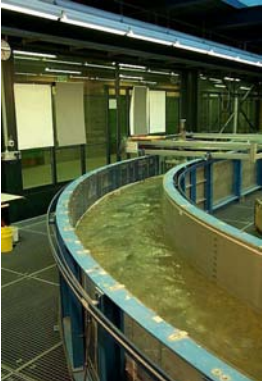
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
70		
85		
100		

Tableau 17: Surface de l'écoulement

Annexe A3.2: Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai

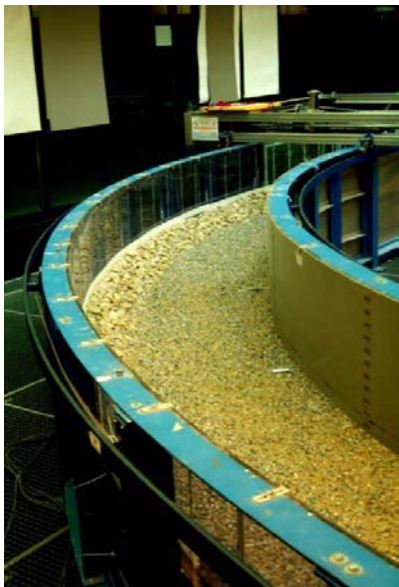
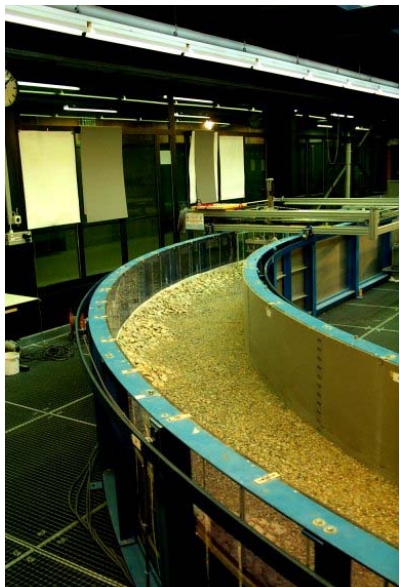


Q [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé
0		
70		

Tableau 18: Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai


Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
0		
70		

Tableau 19: Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai


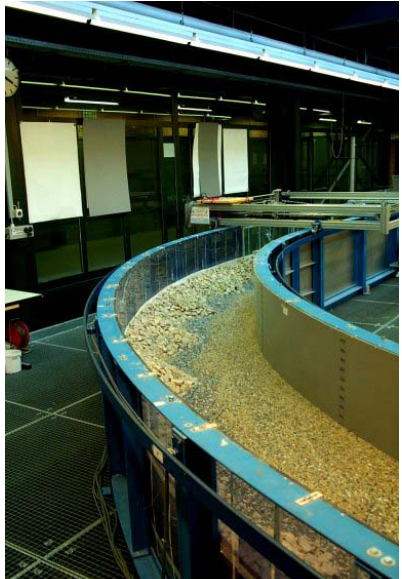


Q [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé
85		
100		

Tableau 20: Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai



Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
85		
100		

Tableau 21: Vues générales du fond depuis l'amont de la courbe après essai

Annexe A3.3: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus régulier







Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 22: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus régulier

Annexe A3.4: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus régulier







Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 23: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus régulier

Annexe A3.5: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé









Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 24: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé

Annexe A3.6: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé









Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 25: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé

Annexe A3.7: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé modifié









Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 26: Vues depuis l'extrémité amont de la courbe, talus ondulé modifié

Annexe A3.8: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé modifié








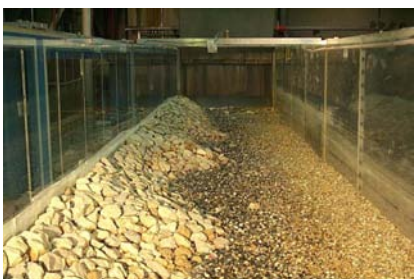
Q [l/s]	Vue vers l'amont	Vue vers l'aval
0		
70		
85		
100		

Tableau 27: Vues depuis l'extrémité aval de la courbe, talus ondulé modifié

Annexe A4: Traitement des mesures de niveau

Annexe A4.1: Mesure de la topographie du fond

Annexe A4.2: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

Annexe A4.3: Mesure de la surface d'eau

Annexe A4.4: Différences de niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen

Annexe A4.1: Mesure de la topographie du fond

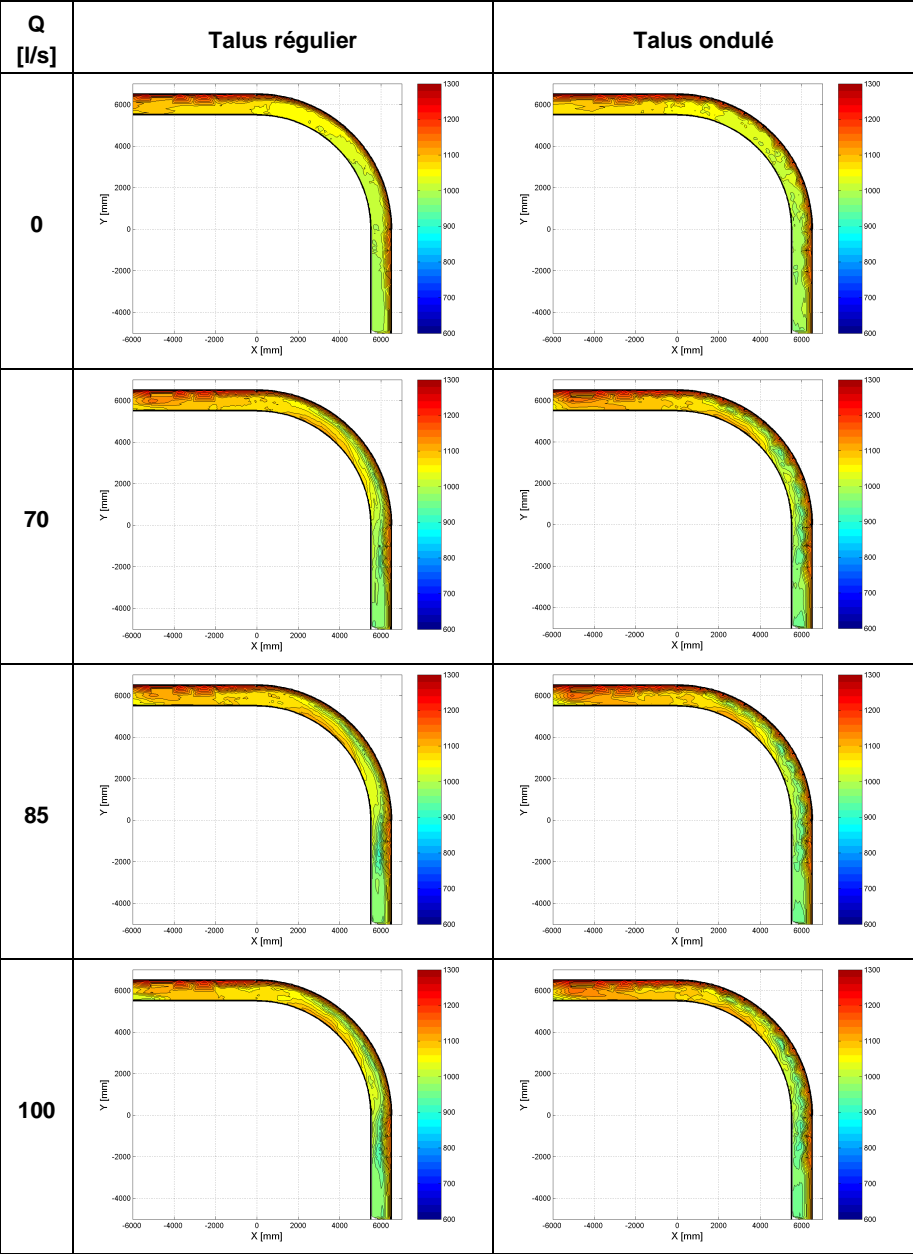


Tableau 28: Mesure de la topographie du fond

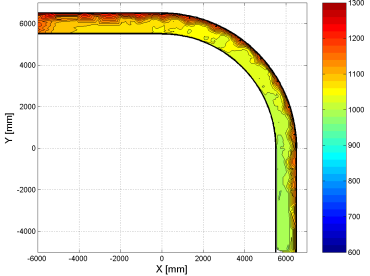
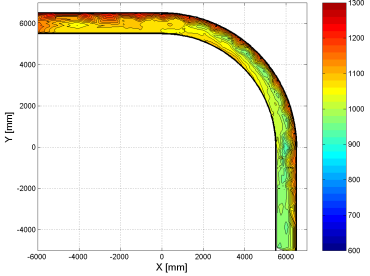
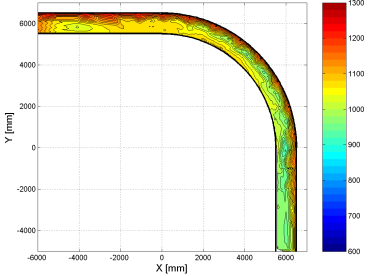
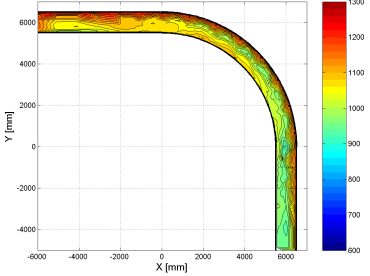
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
0		
70		
85		
100		

Tableau 29: Mesure de la topographie du fond

Annexe A4.2: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

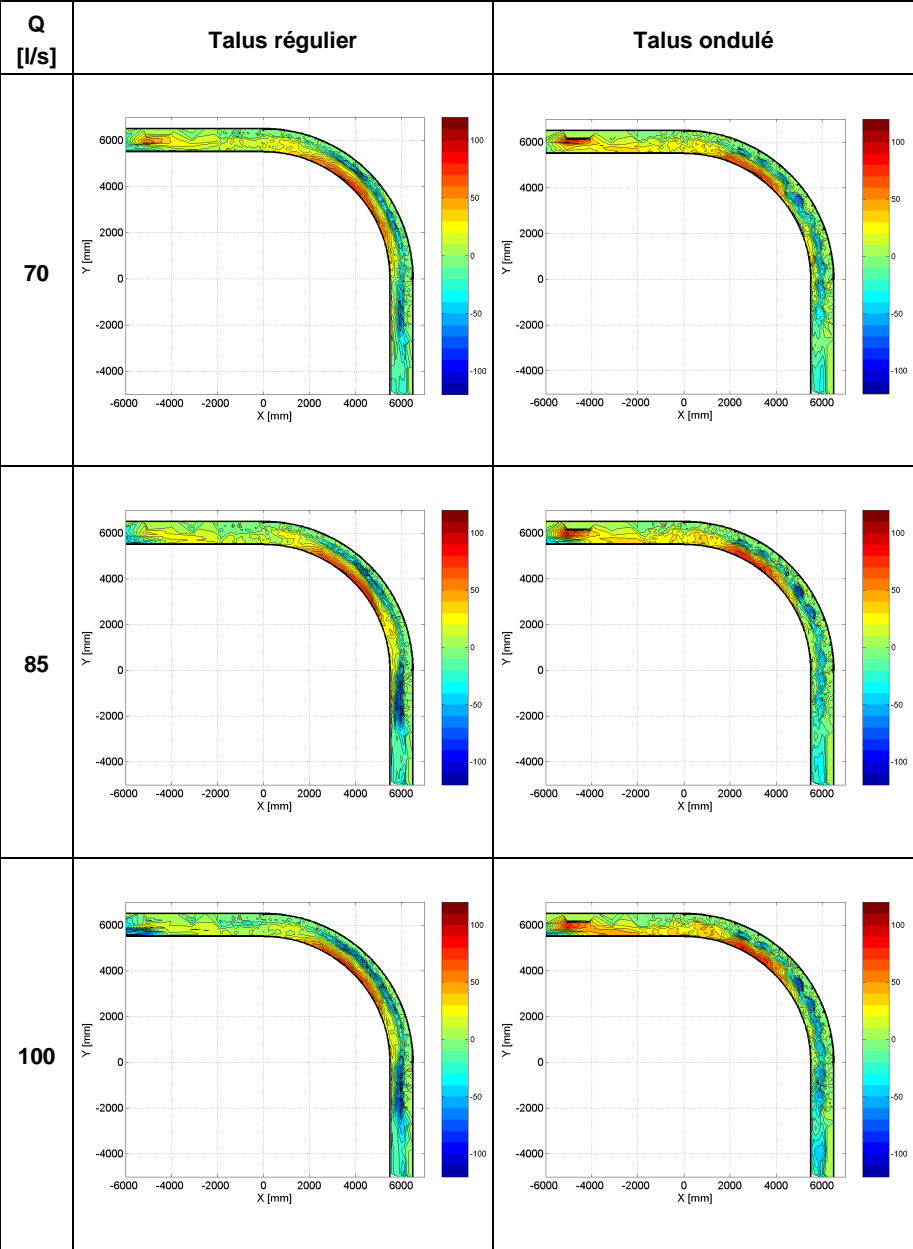


Tableau 30: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

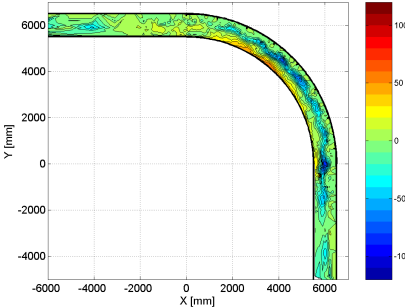
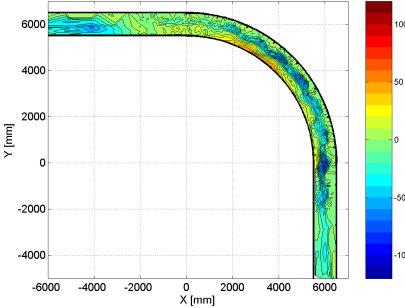
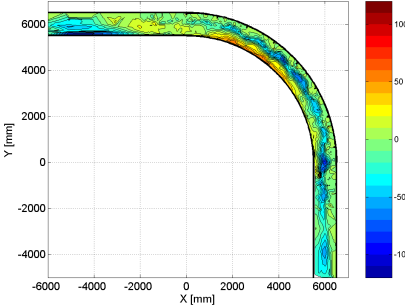
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
70		
85		
100		

Tableau 31: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

Annexe A4.3: Mesure de la surface d'eau

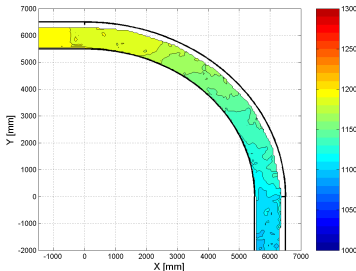
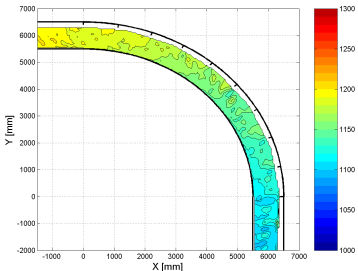
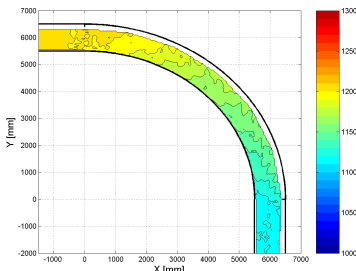
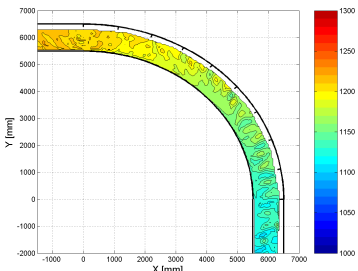
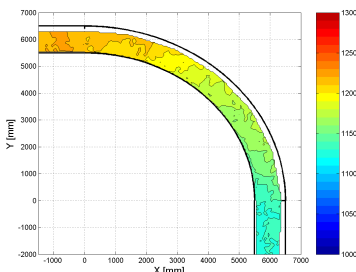
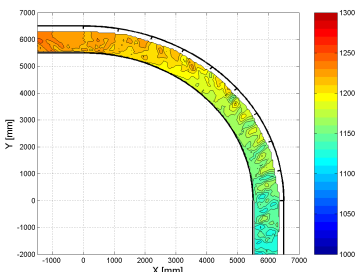
Q [l/s]	Talus régulier	Talus ondulé
0		
70		
85		
100		

Tableau 32: Mesure de la surface d'eau

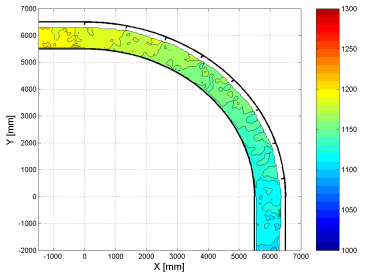
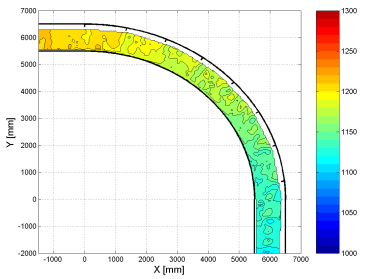
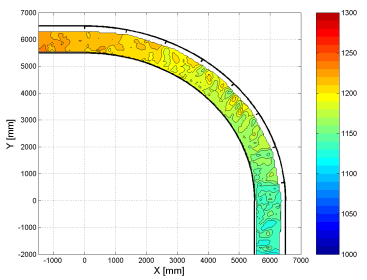
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
0		
70		
85		
100		

Tableau 33: Mesure de la surface d'eau

Annexe A4.4: Différences de niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen

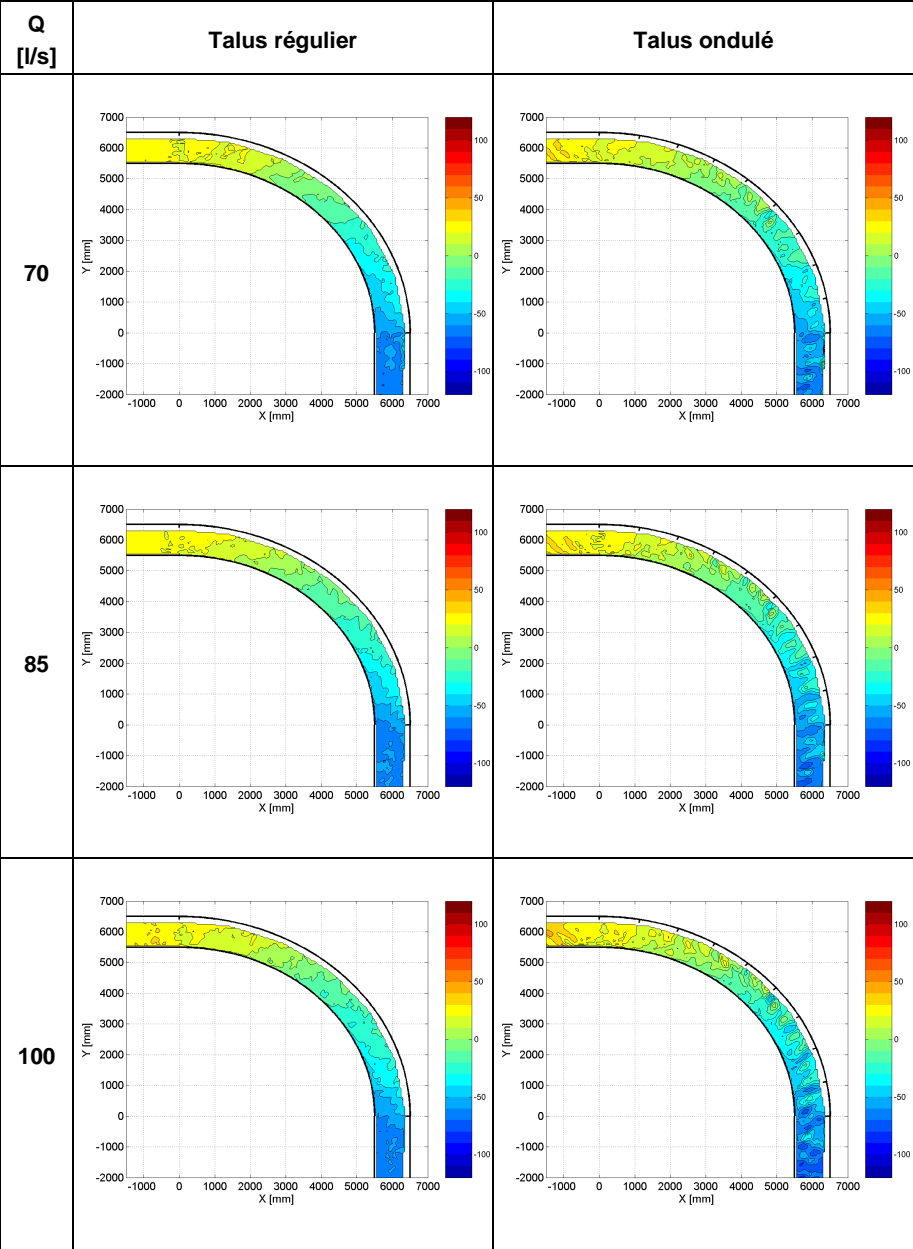


Tableau 34: Différences de niveau du fond par rapport au niveau d'eau moyen

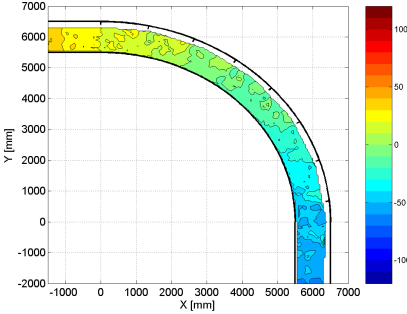
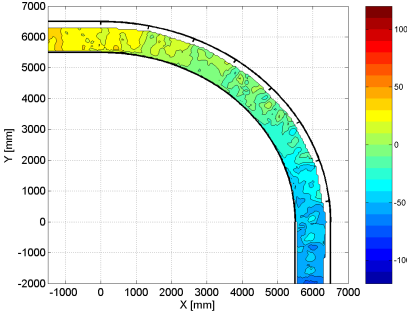
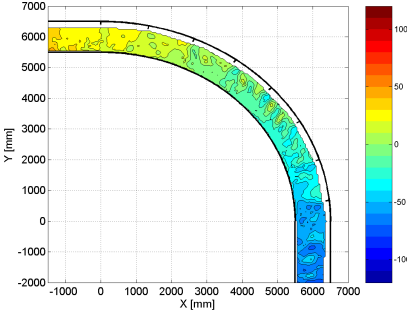
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
70		
85		
100		

Tableau 35: Différences de niveau du fond par rapport au niveau d'eau moyen

Annexe A5: Transport de sédiments

Annexe A5.1: Alimentation en sédiments et échantillons prélevés à la sortie

Annexe A5.2: Alimentation en sédiments cumulée

Annexe A5.1: Alimentation en sédiments et échantillons prélevés à la sortie

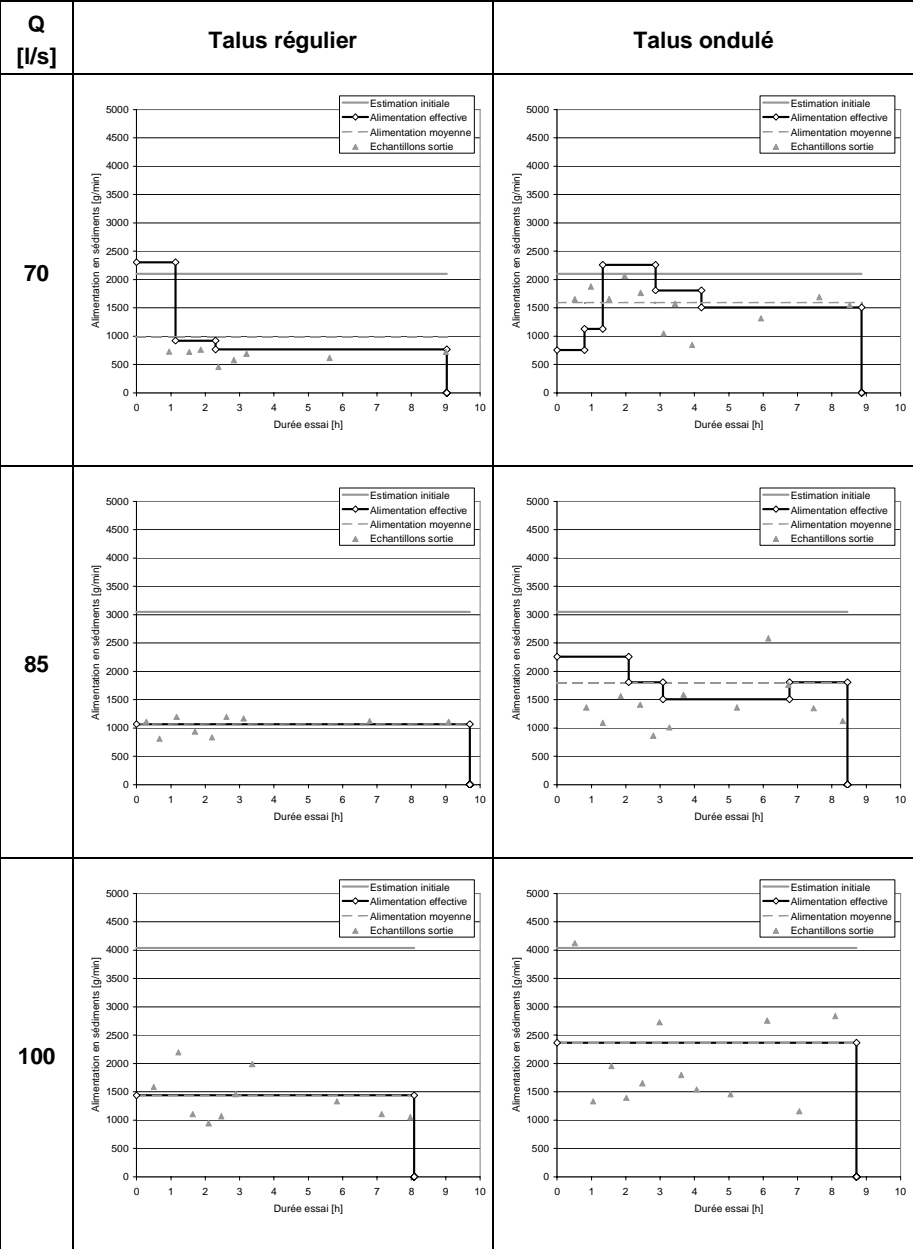


Tableau 36: Alimentation en sédiments et échantillons prélevés à la sortie

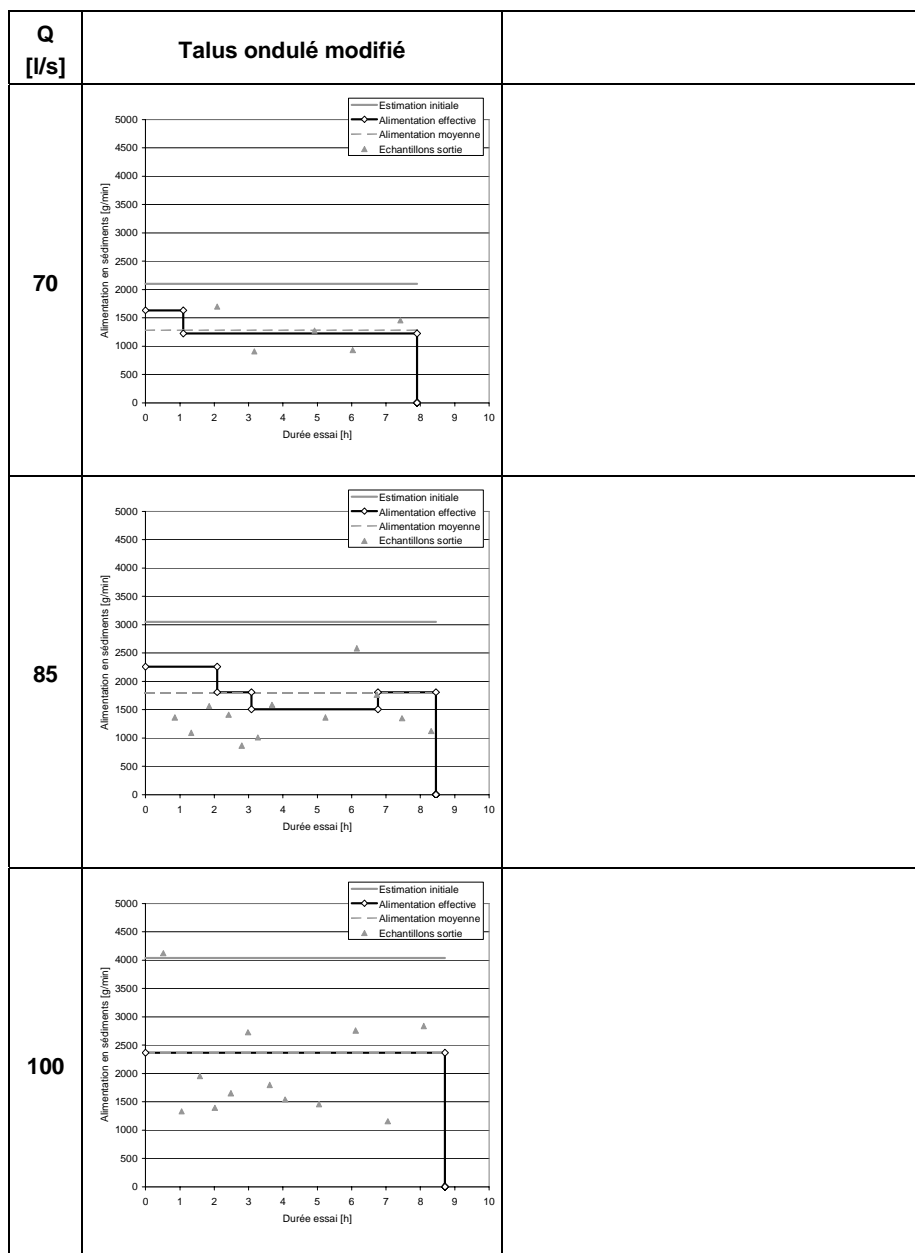


Tableau 37: Alimentation en sédiments et échantillons prélevés à la sortie

Annexe A5.2: Alimentation en sédiments cumulée

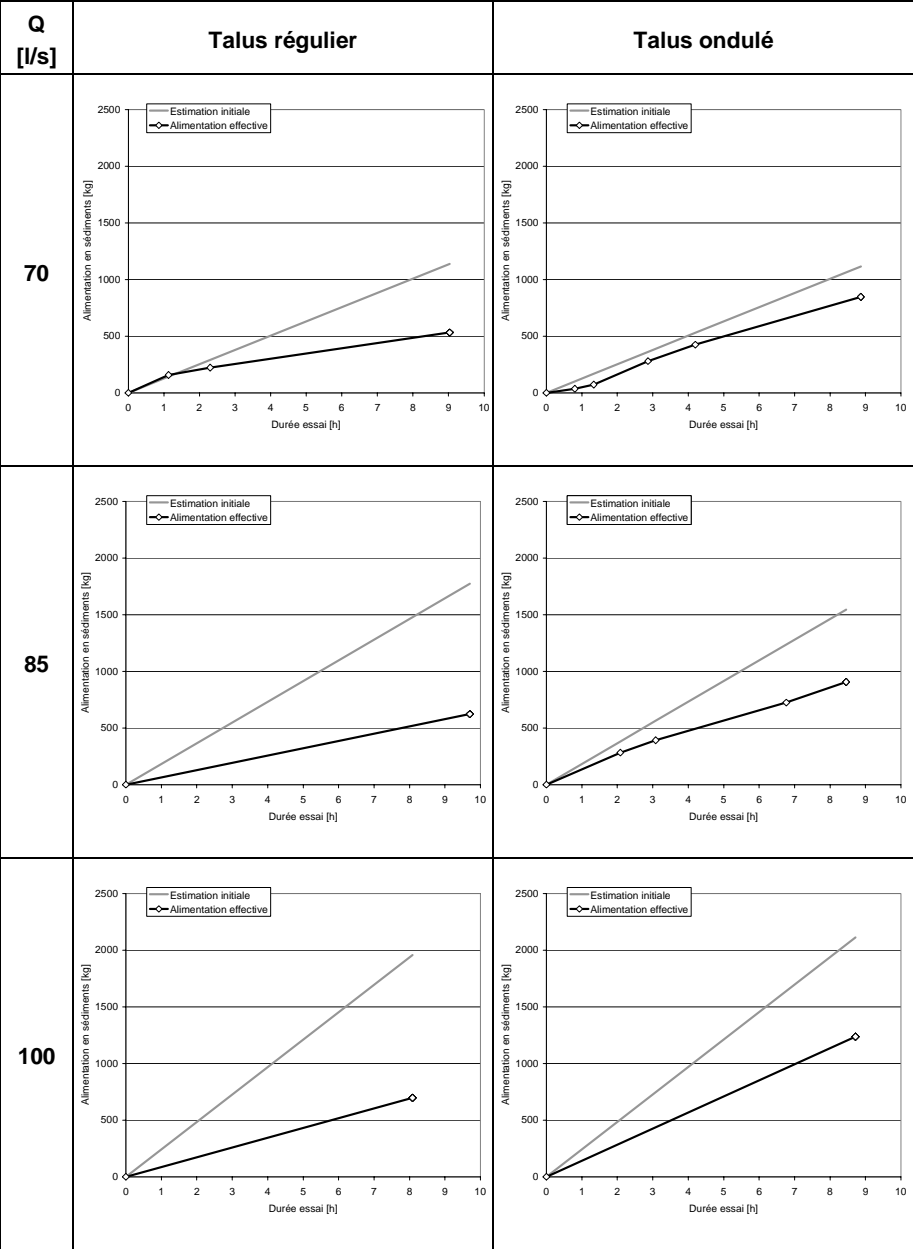


Tableau 38: Alimentation en sédiments cumulée

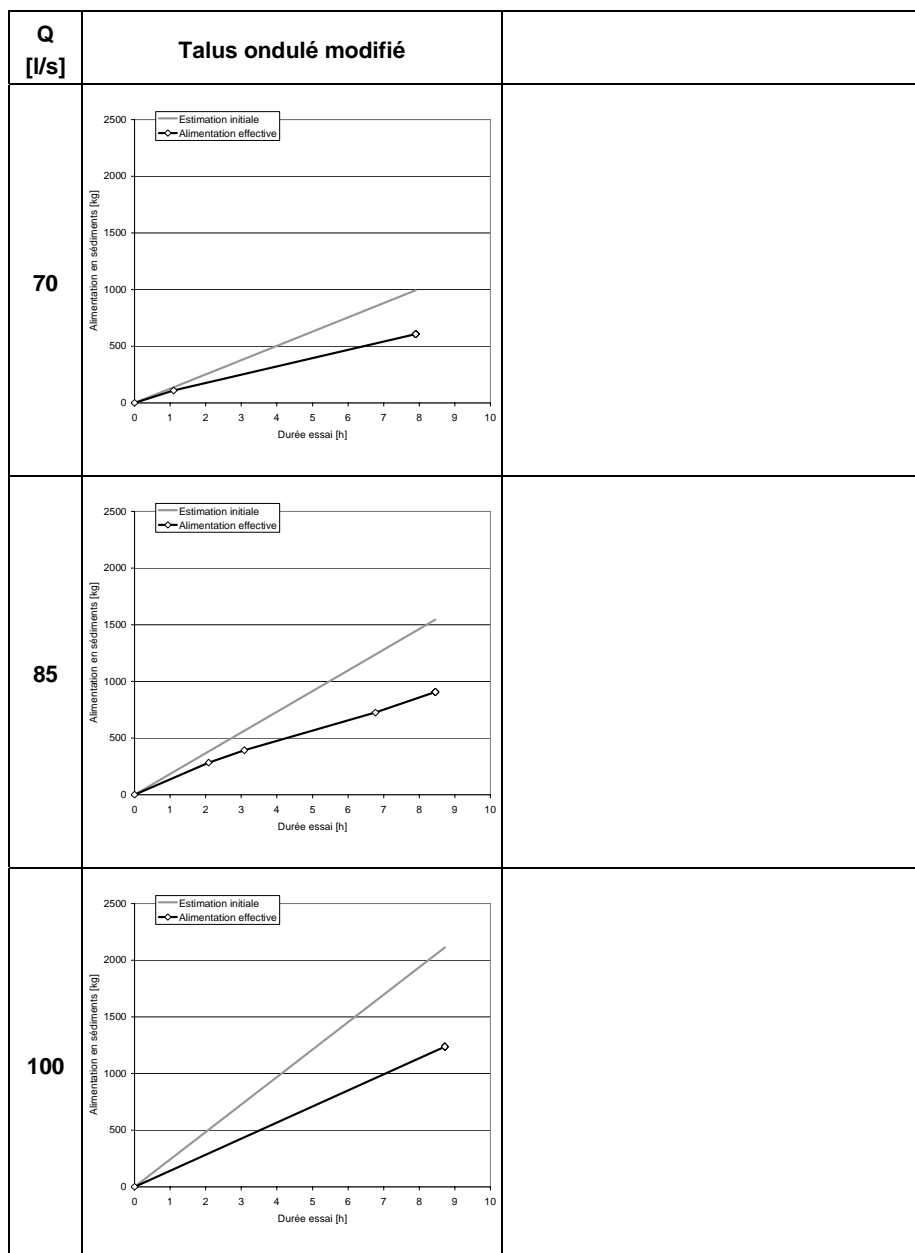


Tableau 39: Alimentation en sédiments cumulée

Annexe A6: Granulométrie des sédiments

Annexe A6.1:	Granulométrie des sédiments prélevés à la sortie du modèle
Annexe A6.2:	Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 70 \text{ l/s}$
Annexe A6.3:	Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 85 \text{ l/s}$
Annexe A6.4:	Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 100 \text{ l/s}$
Annexe A6.5:	Granulométrie de la couche de pavage après essais, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A6.1: Granulométrie des sédiments prélevés à la sortie du modèle

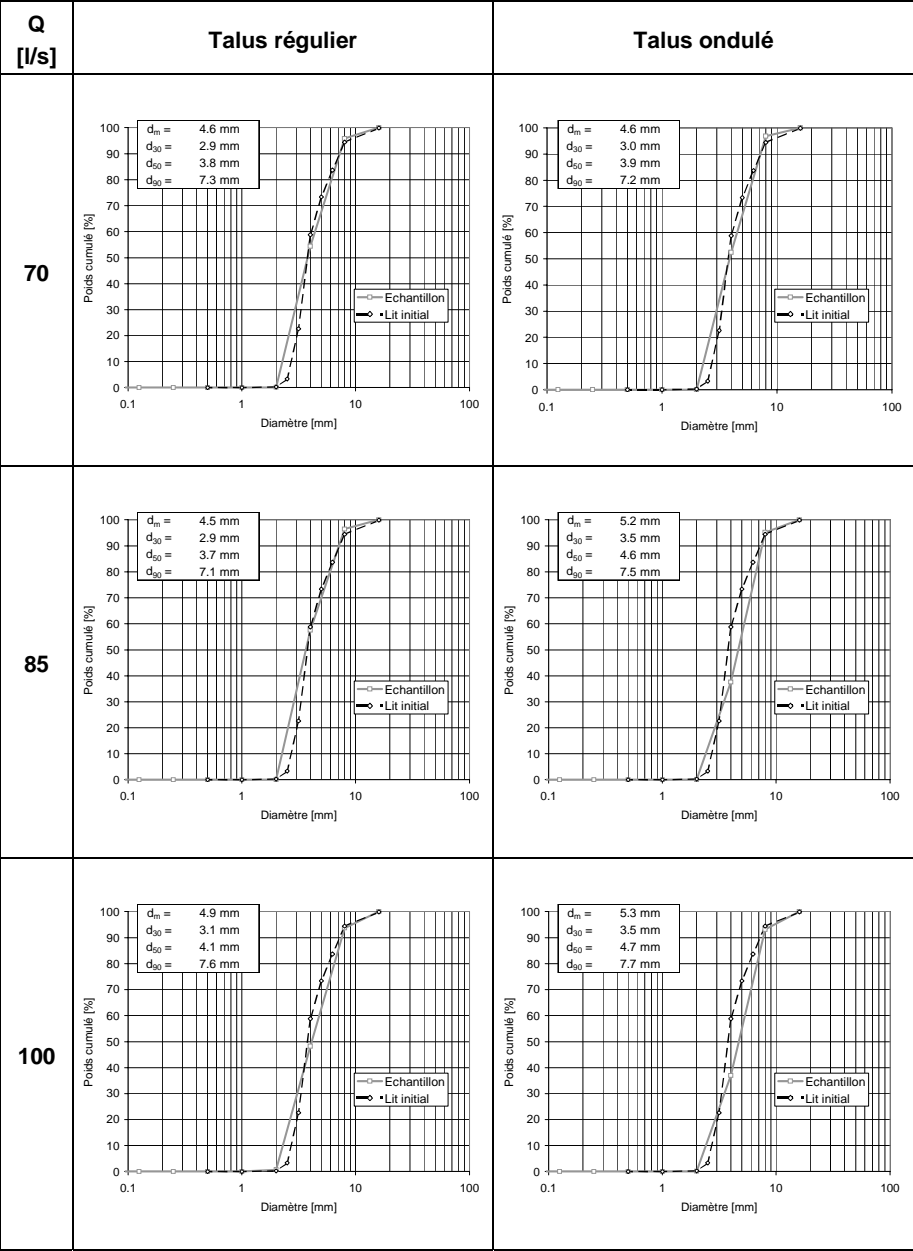


Tableau 40: Granulométrie des sédiments prélevés à la sortie du modèle

Annexe A6.2: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 70 l/s









Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 41: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 70 l/s







Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
60°		
75°		
90°		

Tableau 42: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 70 \text{ l/s}$





Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 43: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 70 \text{ l/s}$




Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
60°		
75°		
90°		

Tableau 44: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 70$ l/s

Annexe A6.3: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 85 l/s









Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 45: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 85 l/s







Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
60°		
75°		
90°		

Tableau 46: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 85 \text{ l/s}$





Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 47: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 85 \text{ l/s}$




Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
60°		
75°		
90°		

Tableau 48: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A6.4: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 100 l/s









Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 49: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, Q = 100 l/s







Pos. [°]	Talus régulier	Talus ondulé
60°		
75°		
90°		

Tableau 50: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 100 \text{ l/s}$





Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
0°		
15°		
30°		
45°		

Tableau 51: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 100 \text{ l/s}$




Pos. [°]	Talus ondulé modifié	
60°		
75°		
90°		

Tableau 52: Erosion et tri granulométrique dans la courbe, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A6.5: Granulométrie de la couche de pavage, après essais, Q = 100 l/s

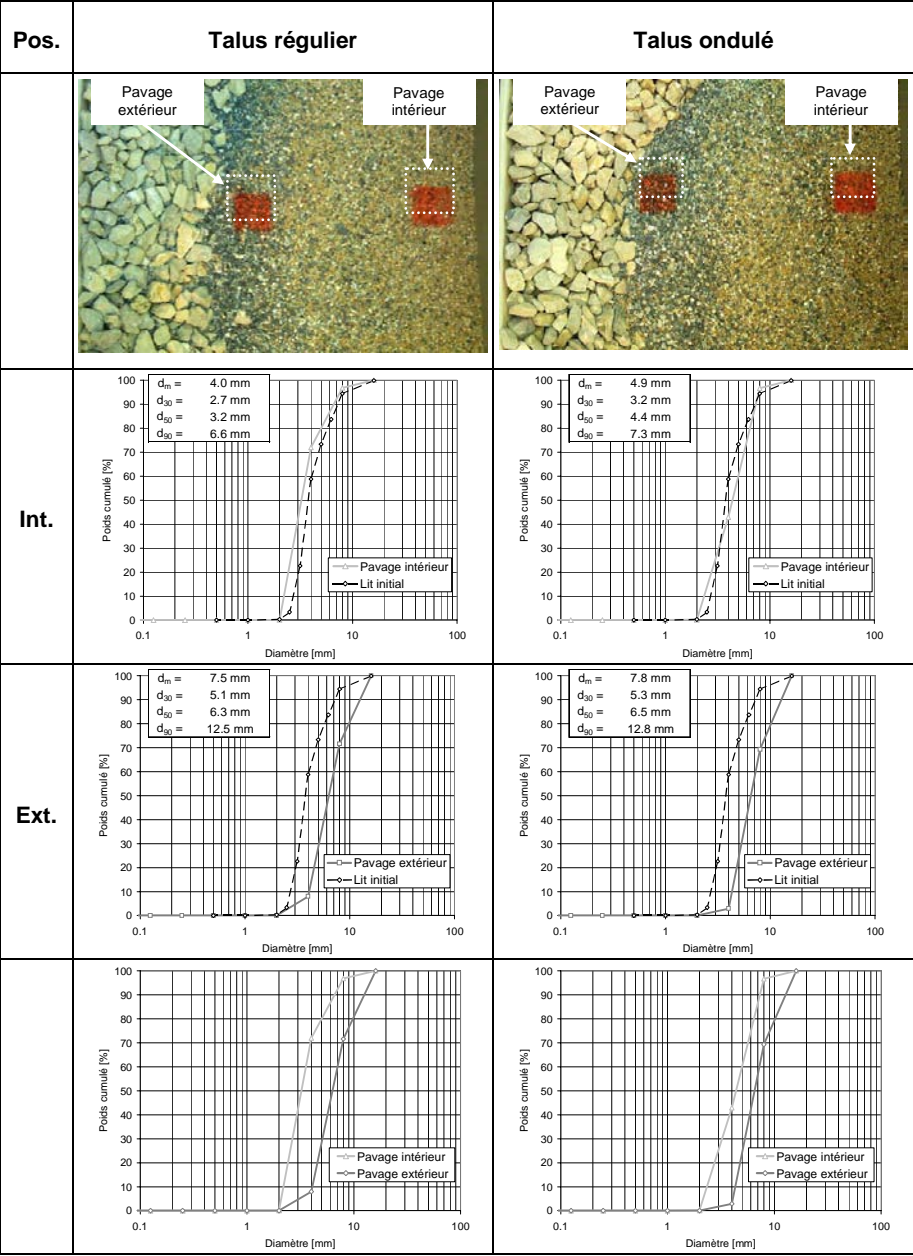


Tableau 53: Granulométrie de la couche de pavage, après essai, Q = 100 l/s

Annexe A7: Profils en travers

Annexe A7.1: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

Annexe A7.2: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A7.3: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A7.1: Profils en travers, Q = 70 l/s

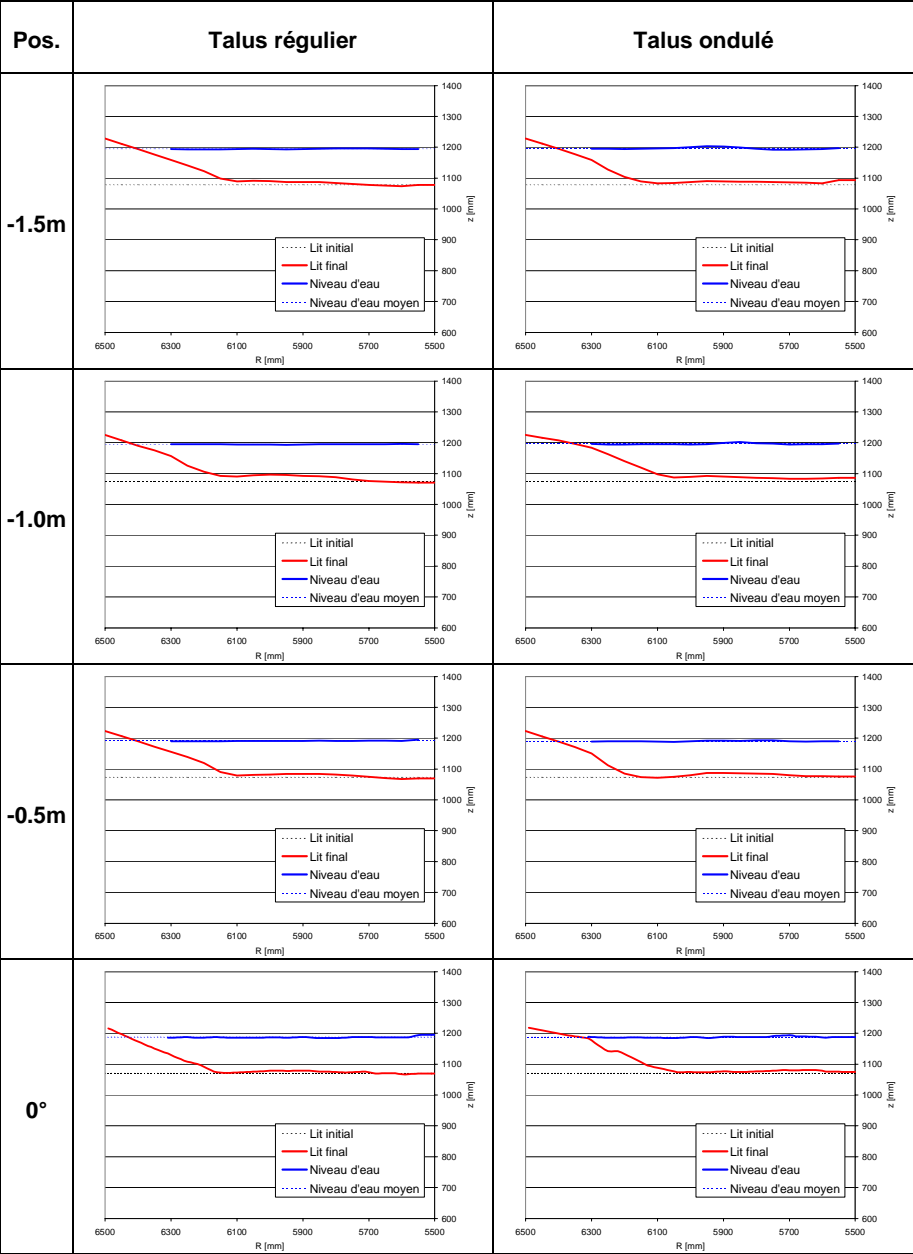


Tableau 54: Profils en travers, Q = 70 l/s

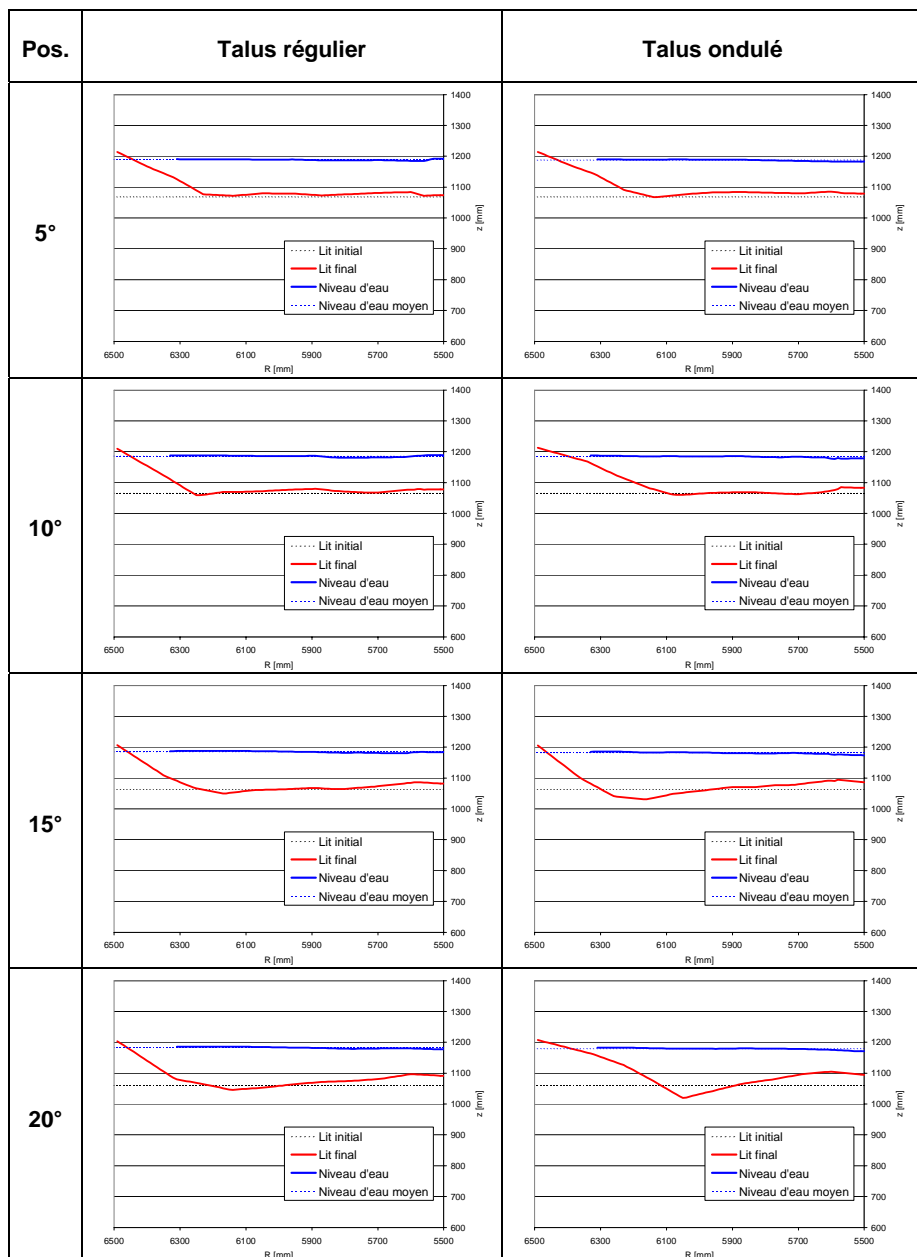


Tableau 55: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

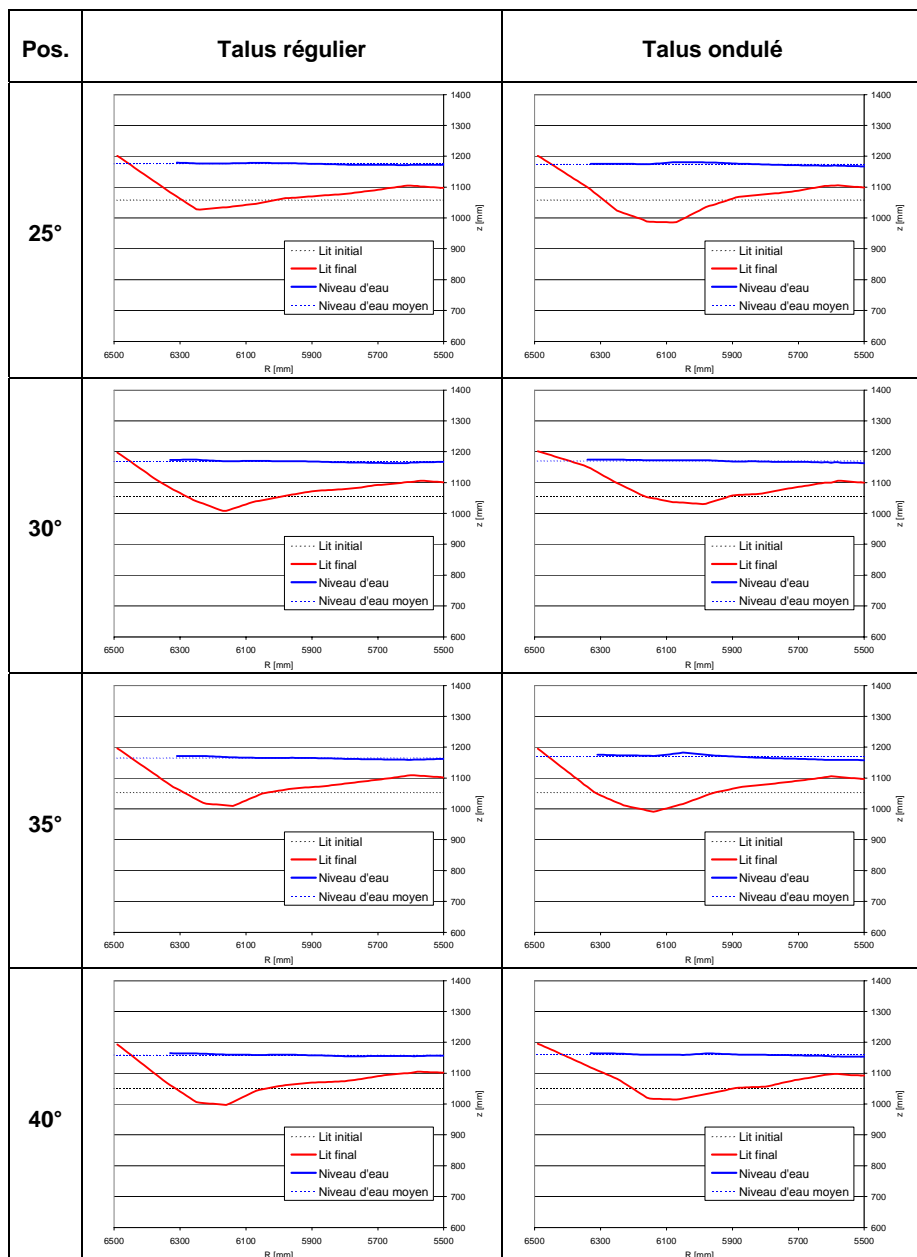


Tableau 56: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

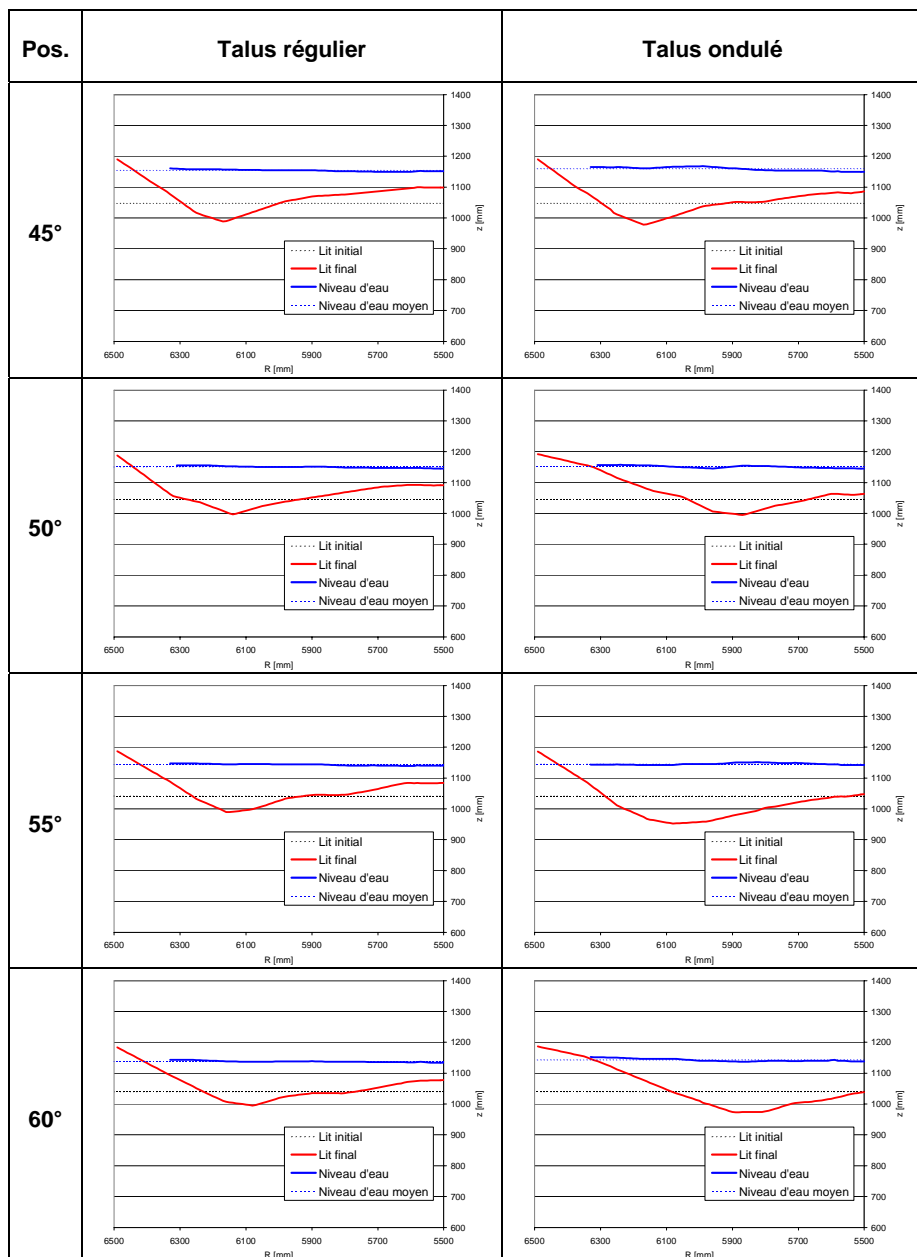


Tableau 57: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

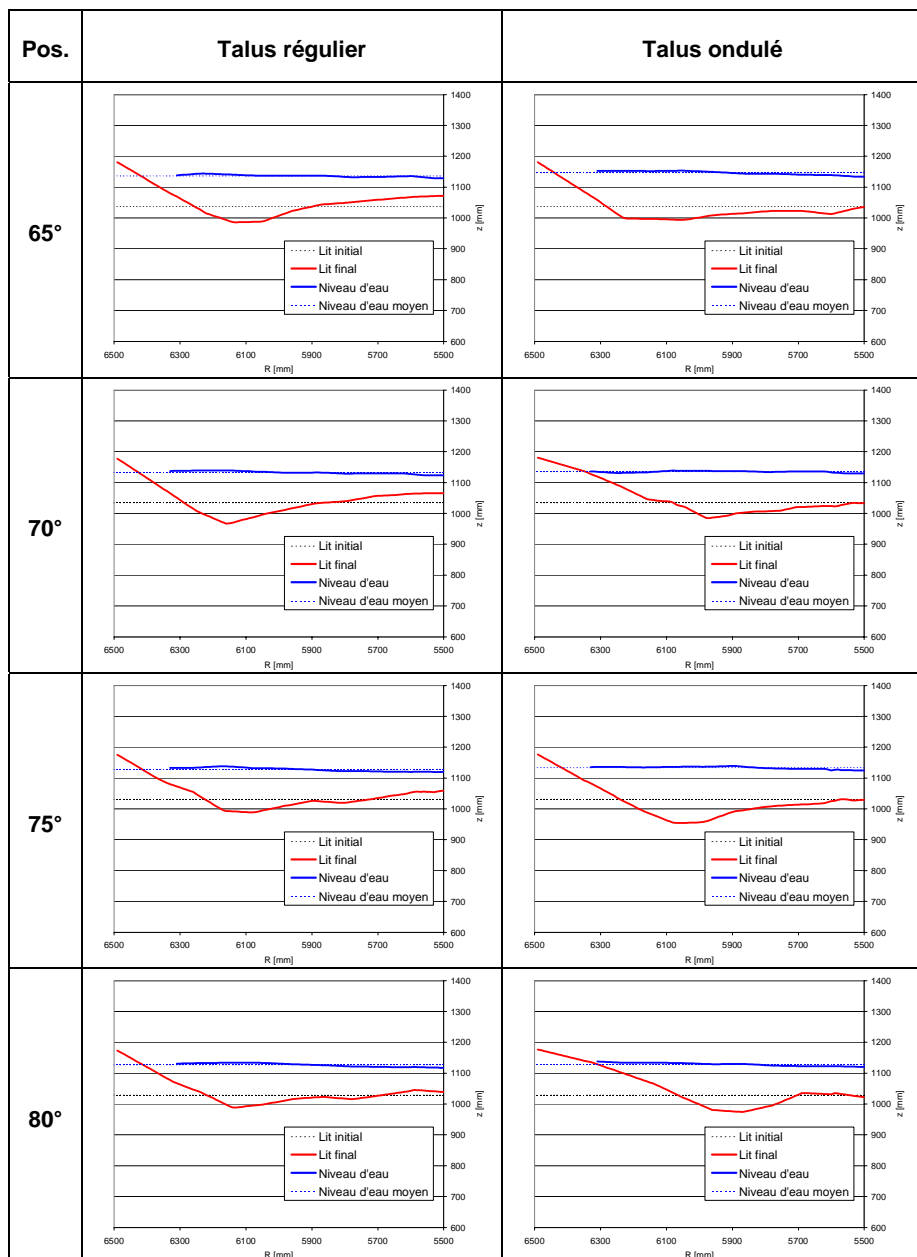


Tableau 58: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

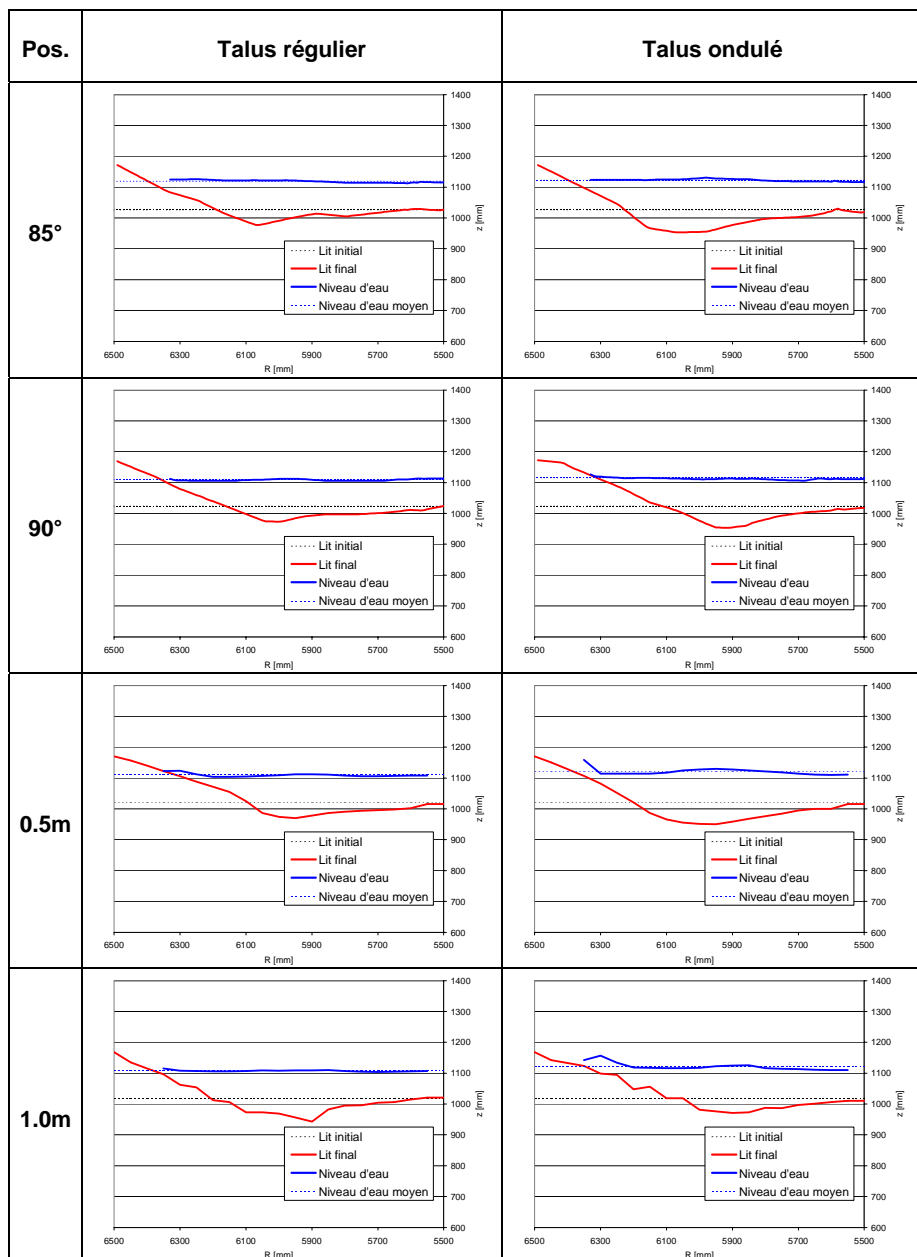


Tableau 59: Profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

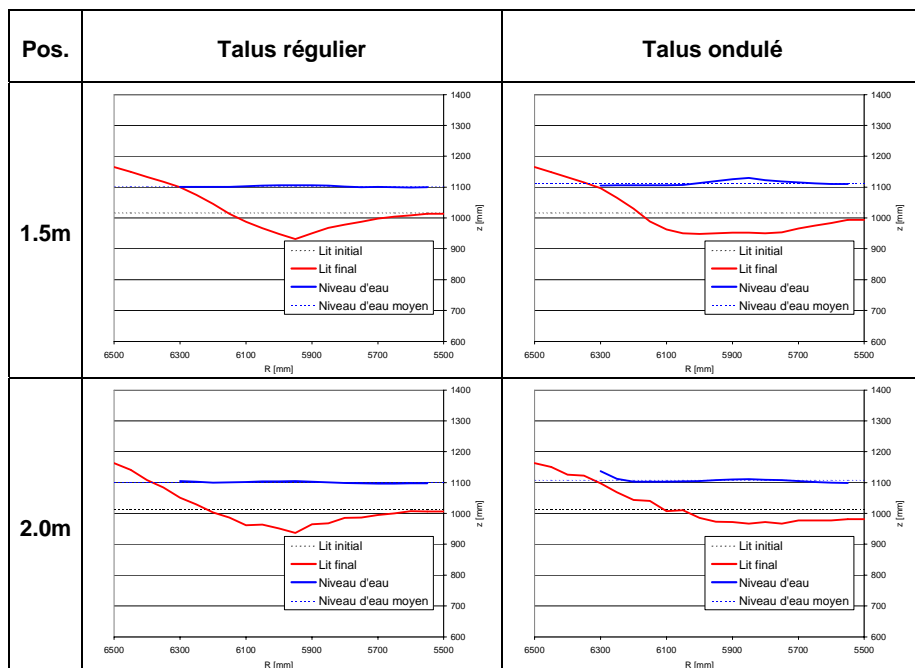


Tableau 60: Profils en travers, $Q = 70$ l/s

Annexe A7.2: Profils en travers, Q = 85 l/s

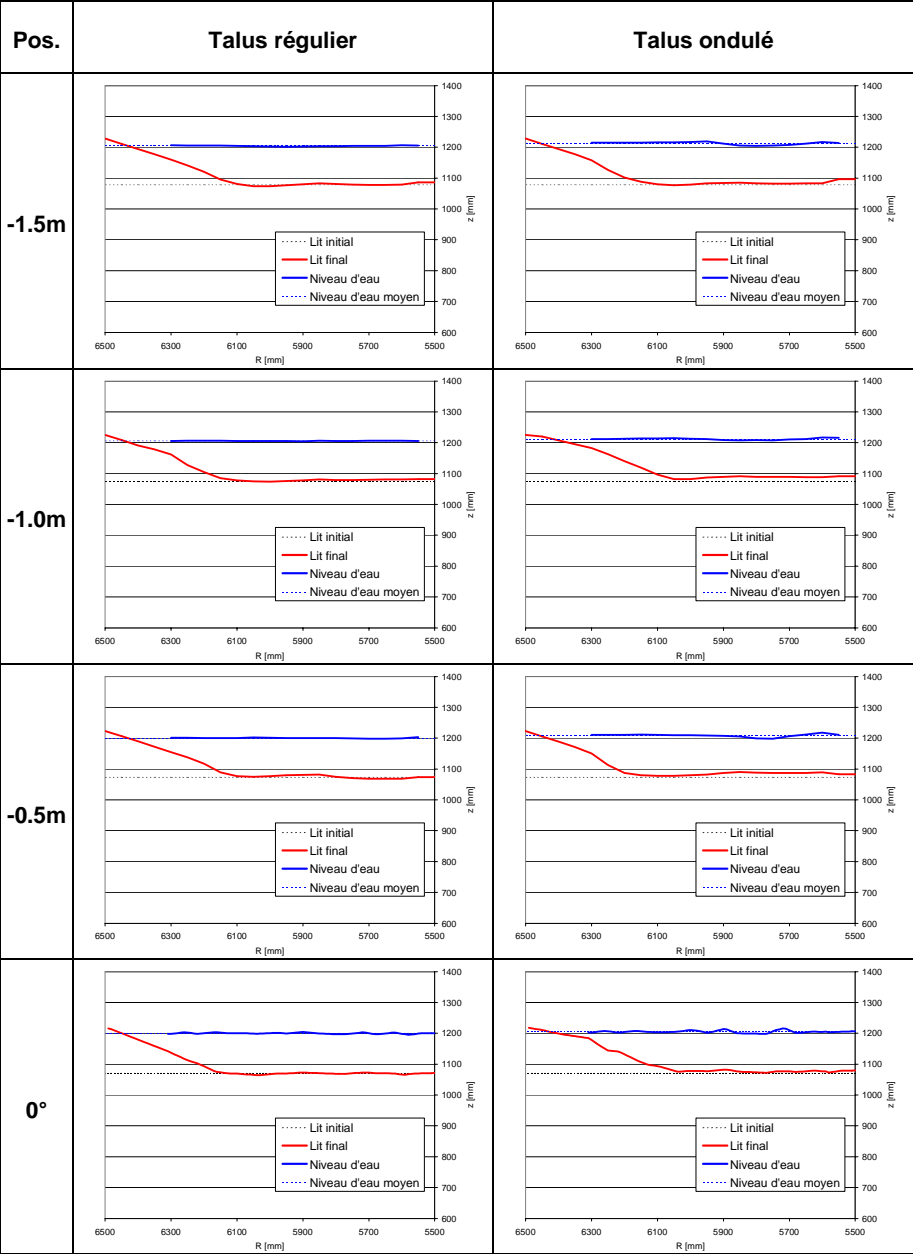


Tableau 61: Profils en travers, Q = 85 l/s

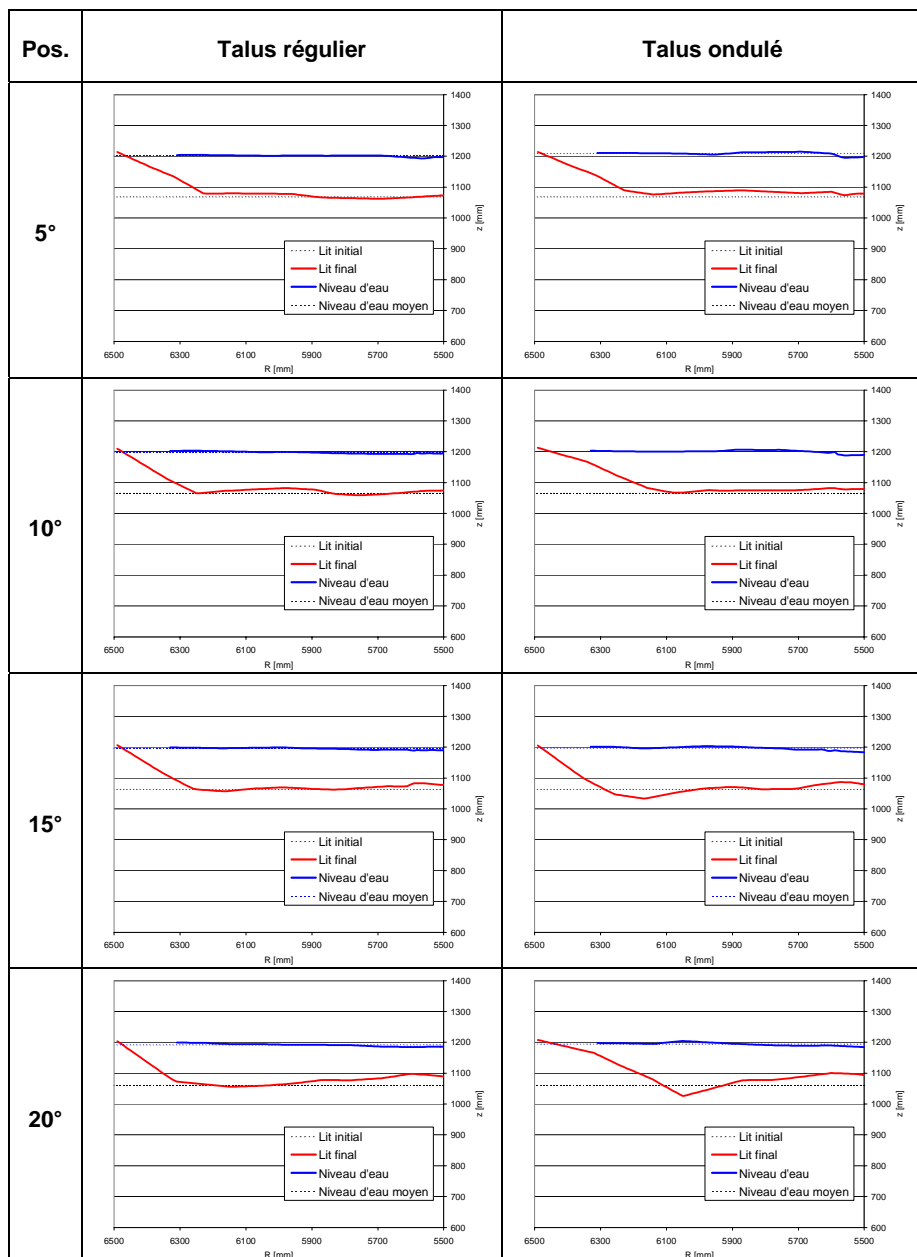


Tableau 62: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

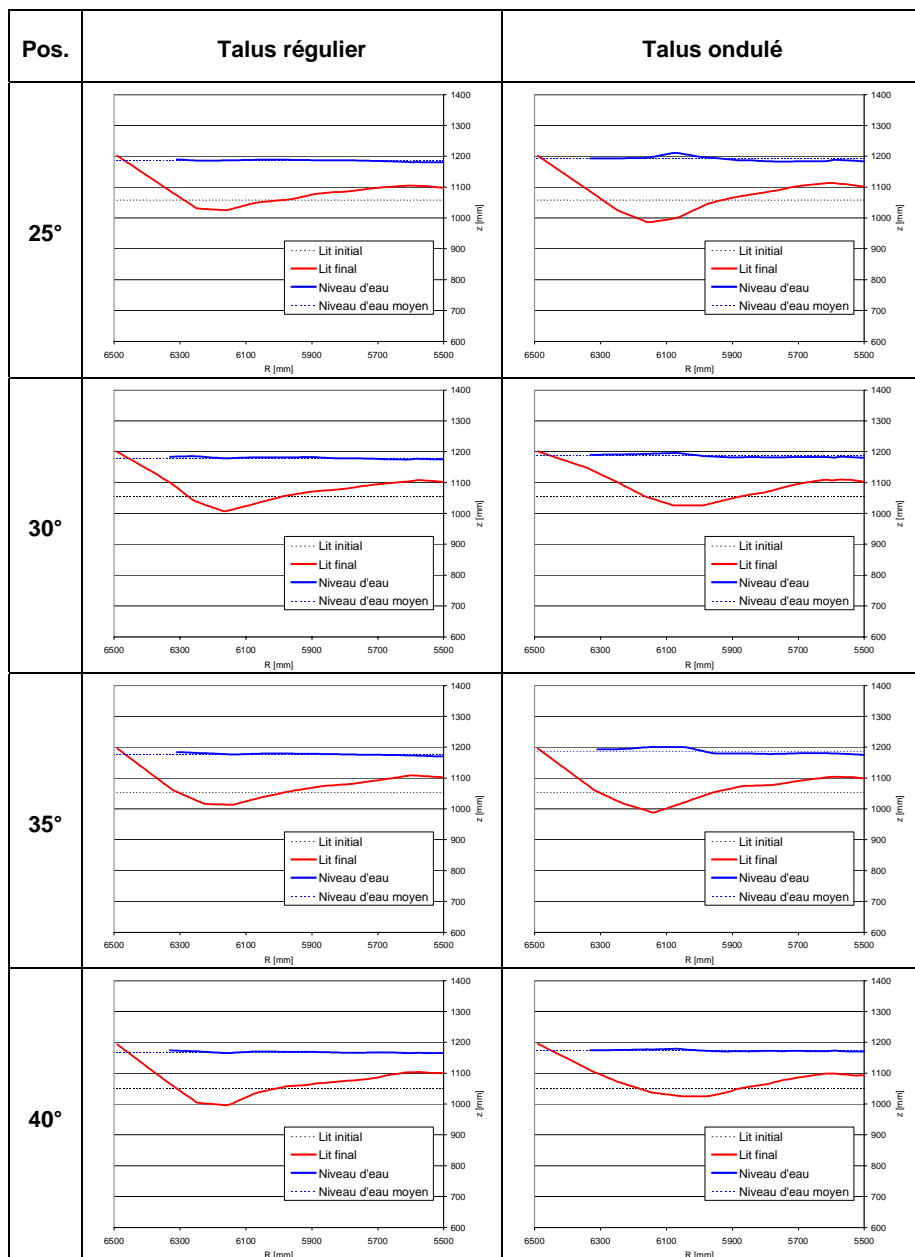


Tableau 63: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

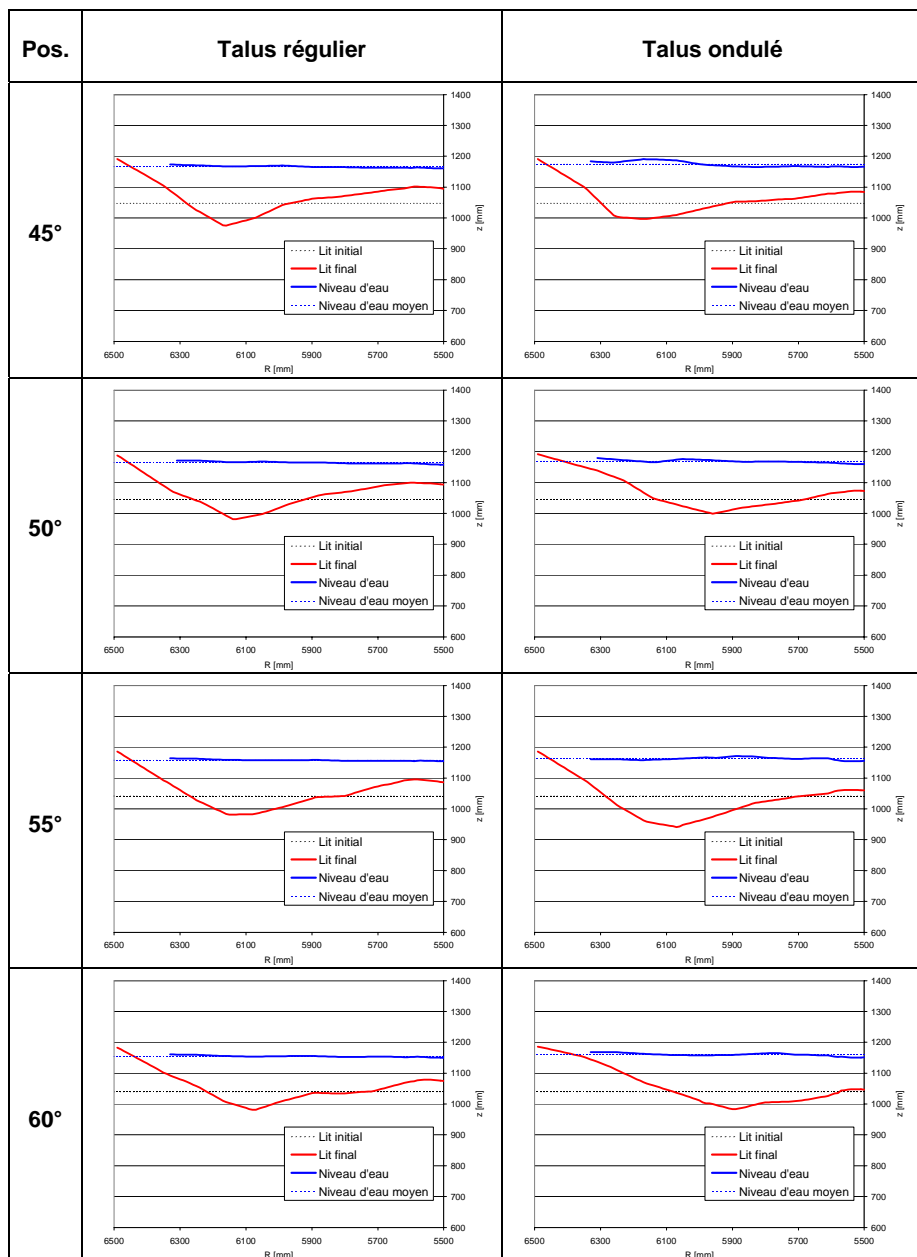


Tableau 64: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

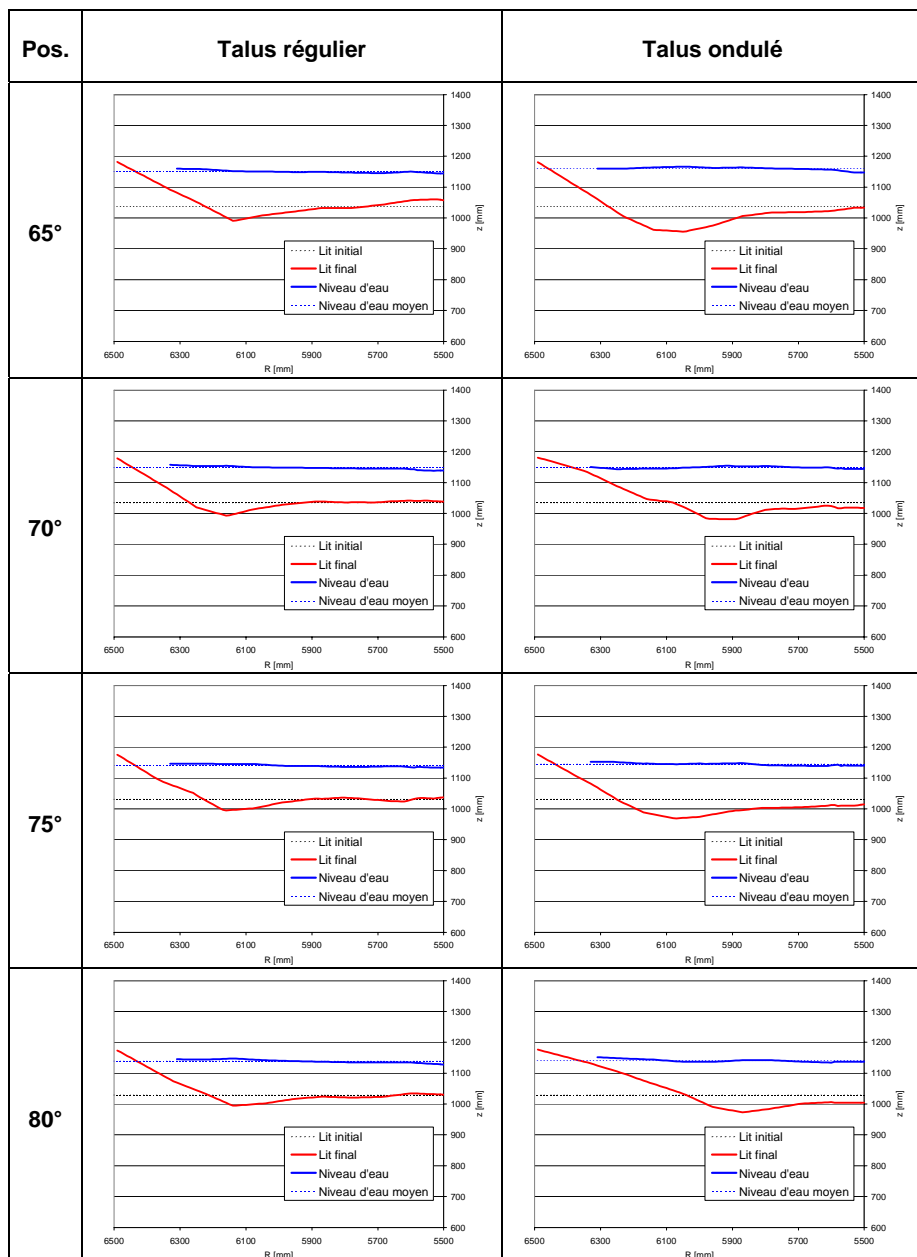


Tableau 65: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

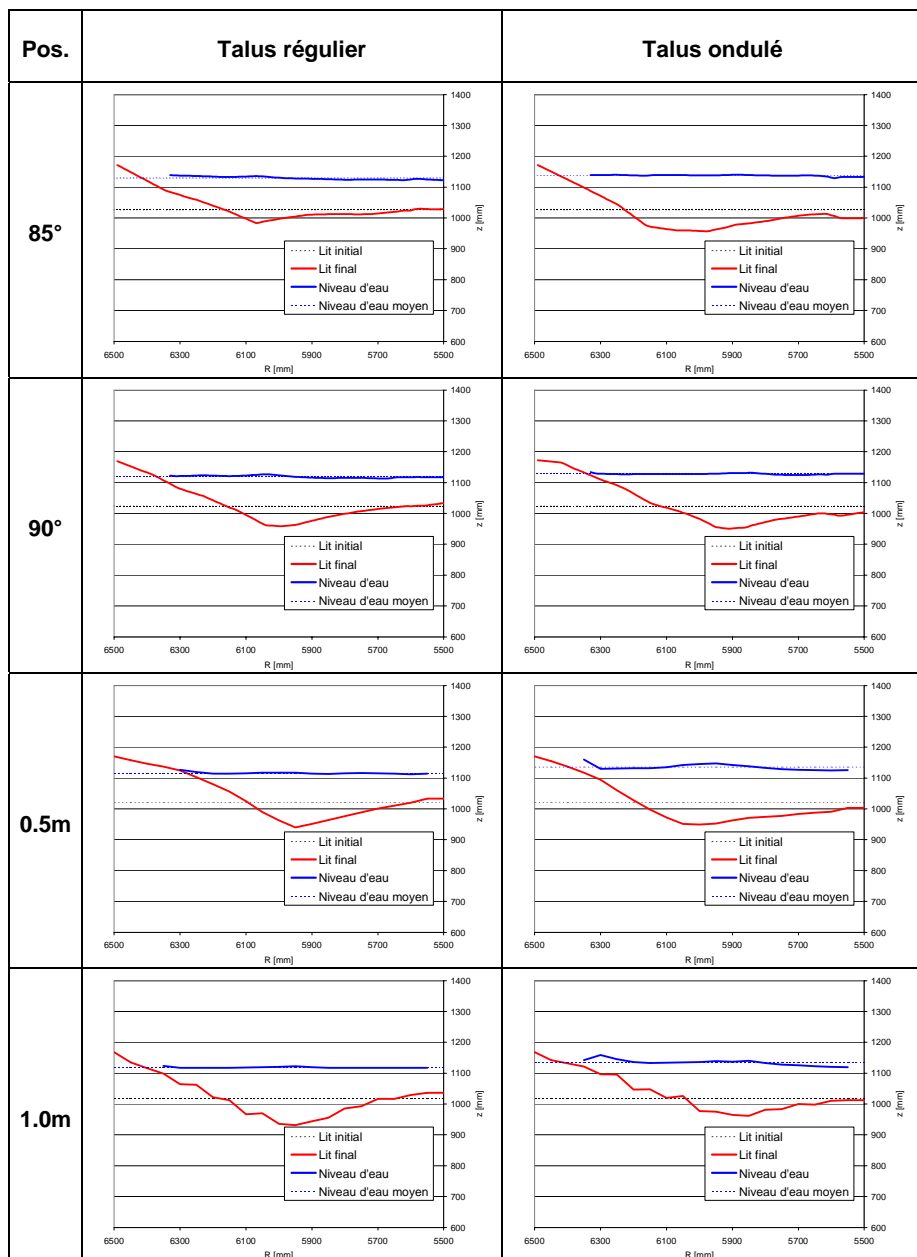


Tableau 66: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

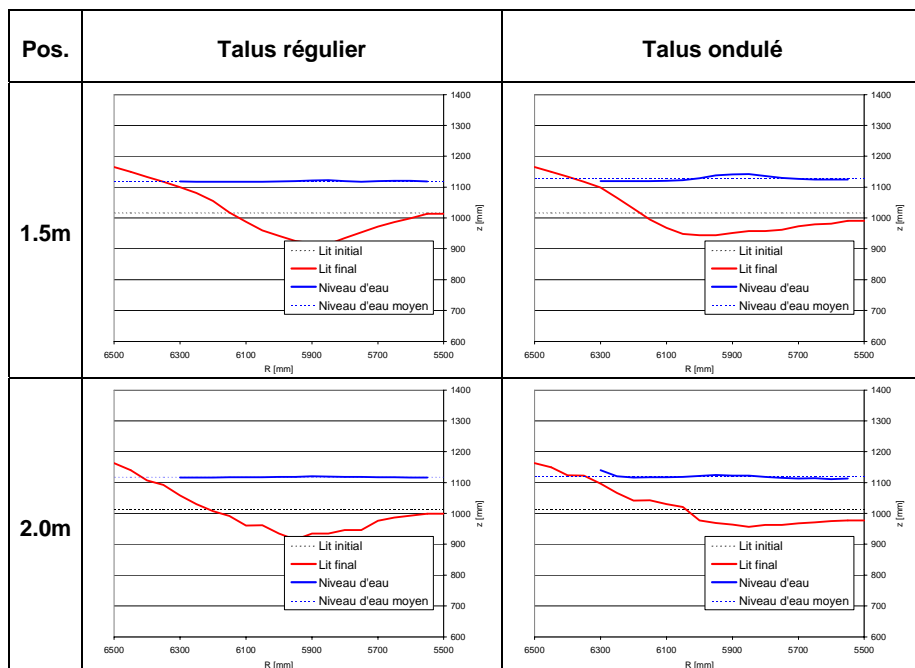


Tableau 67: Profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A7.3: Profils en travers, Q = 100 l/s

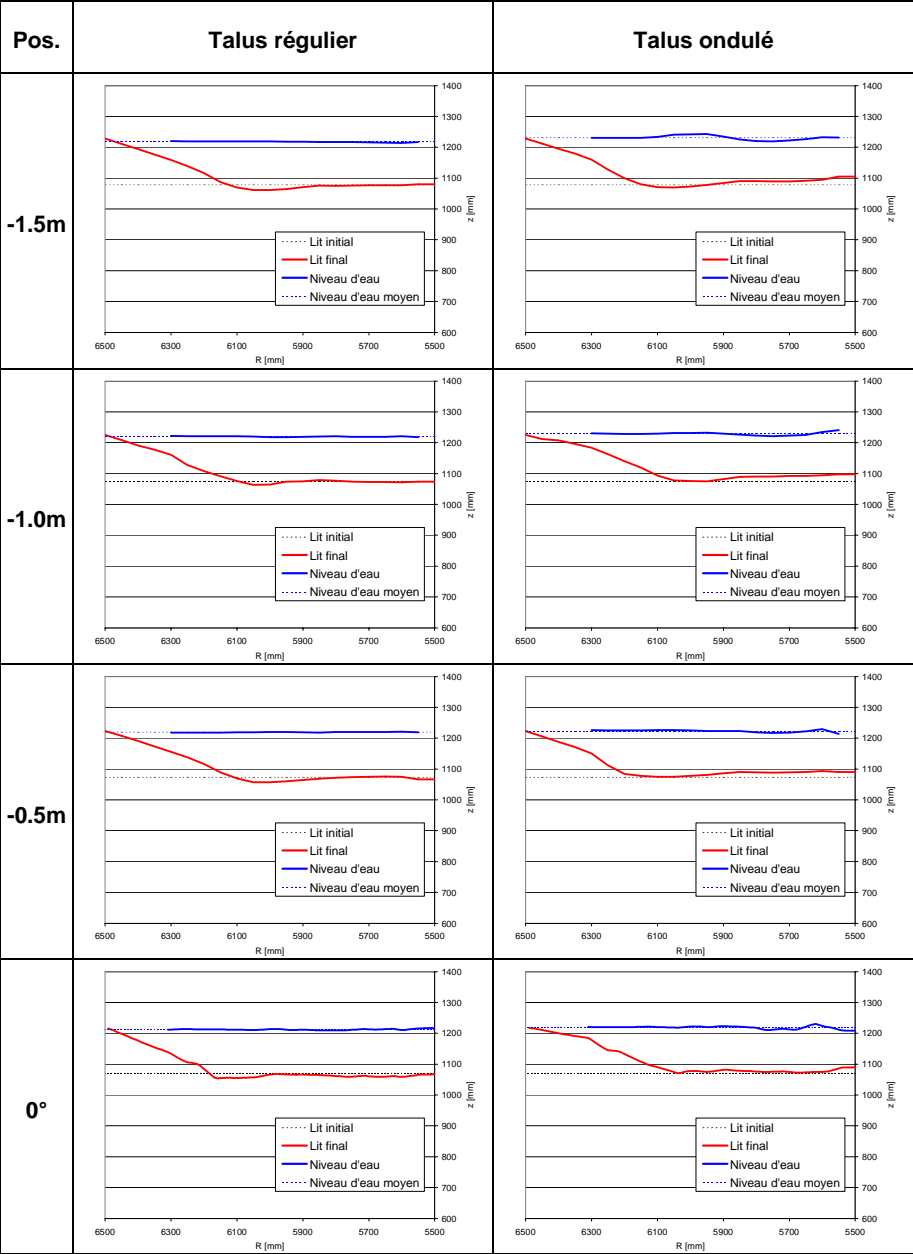


Tableau 68: Profils en travers, Q = 10 l/s

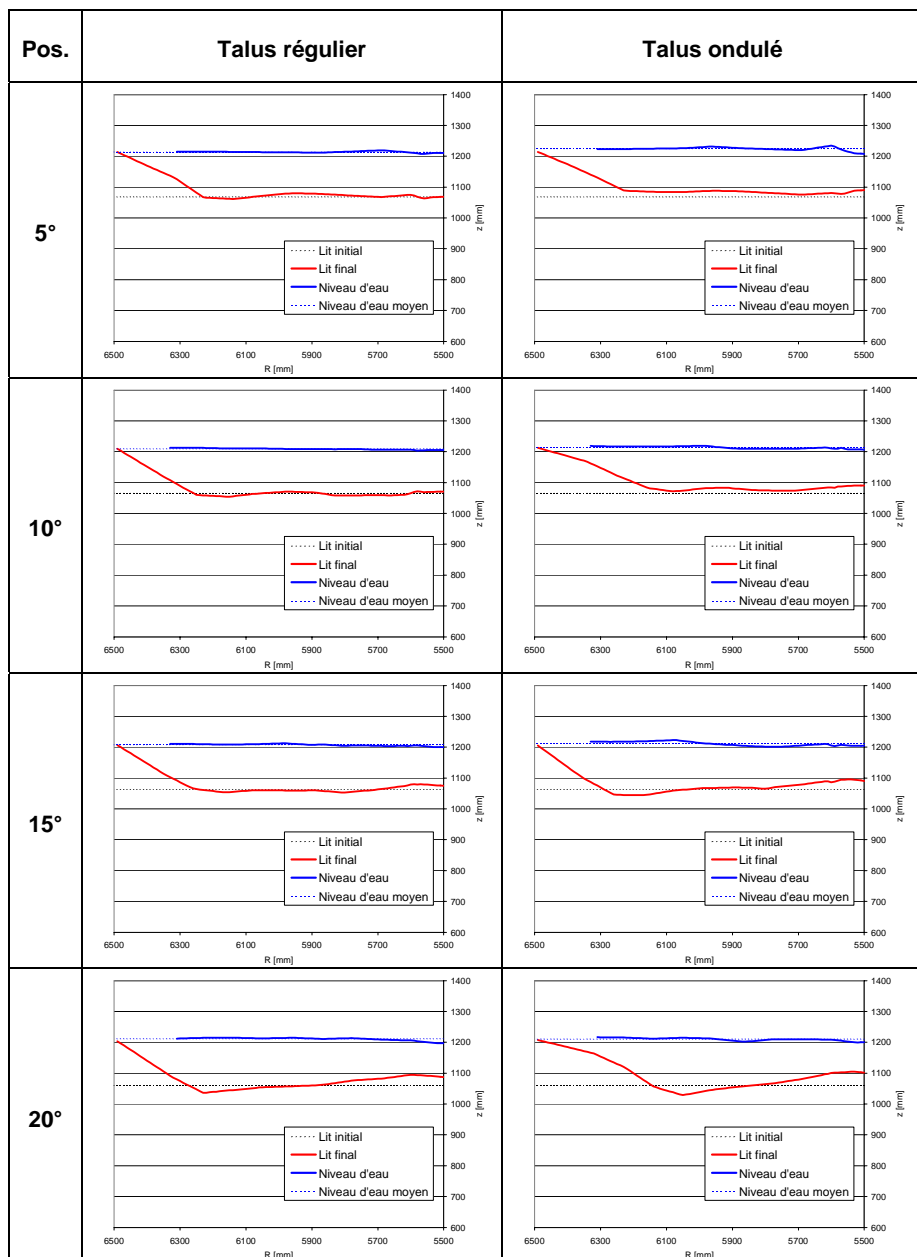


Tableau 69: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

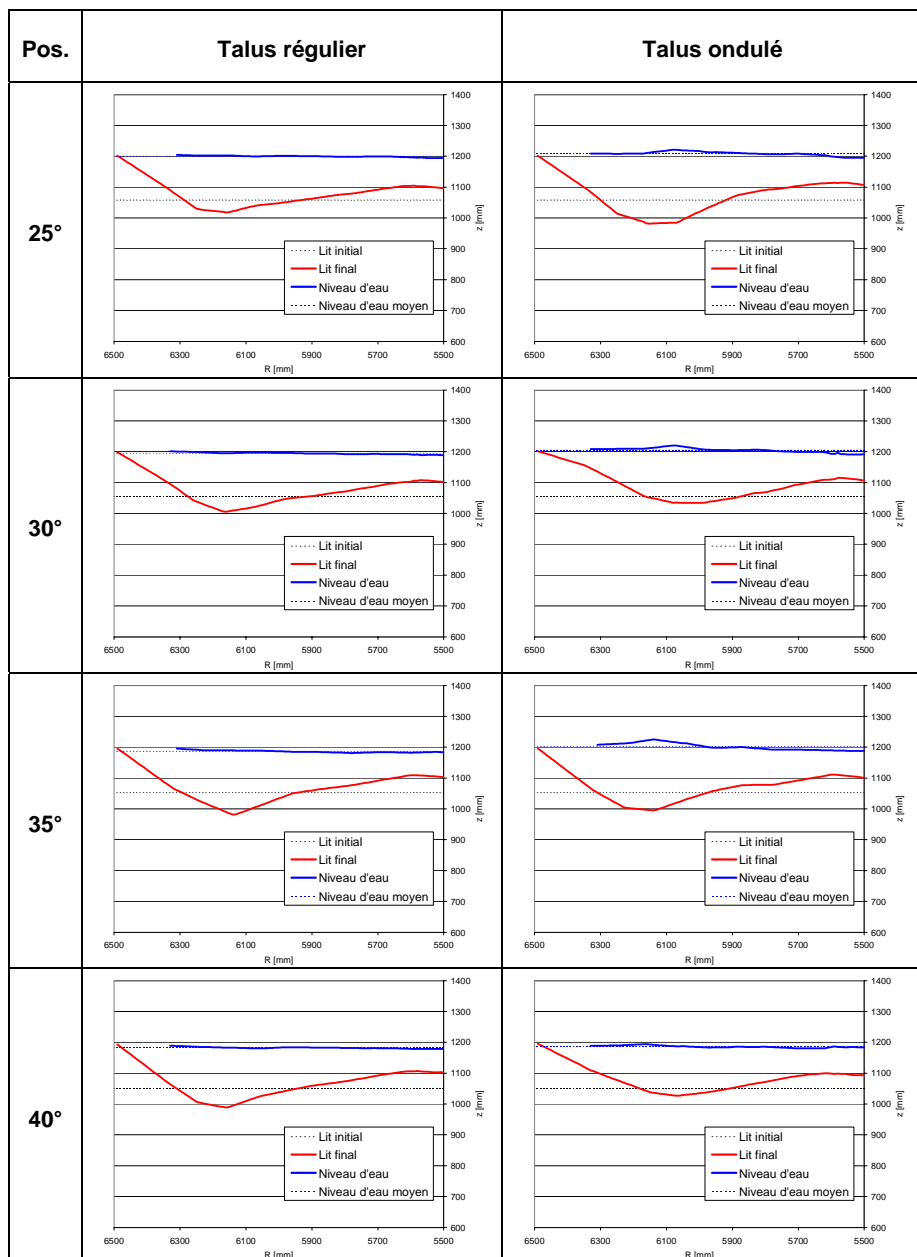


Tableau 70: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

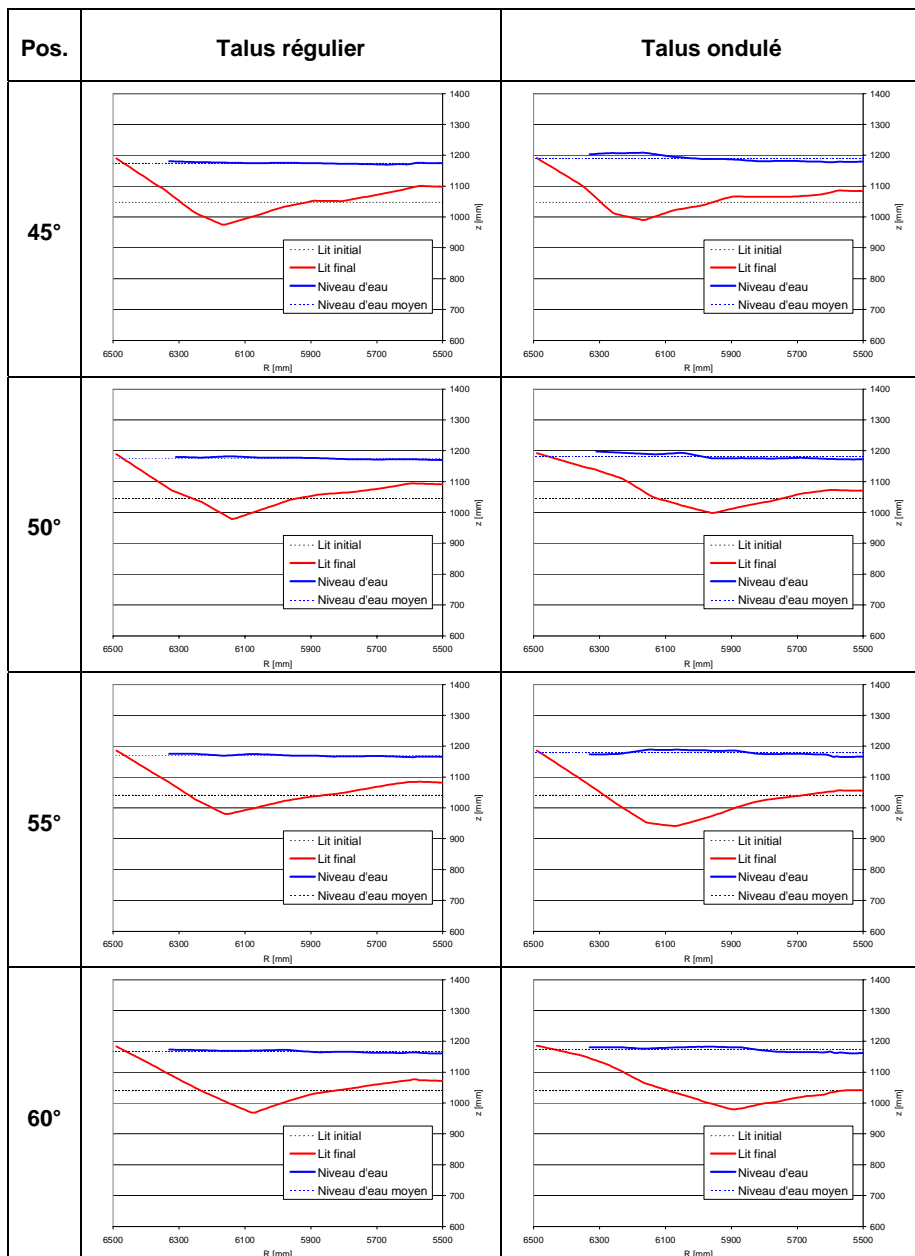


Tableau 71: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

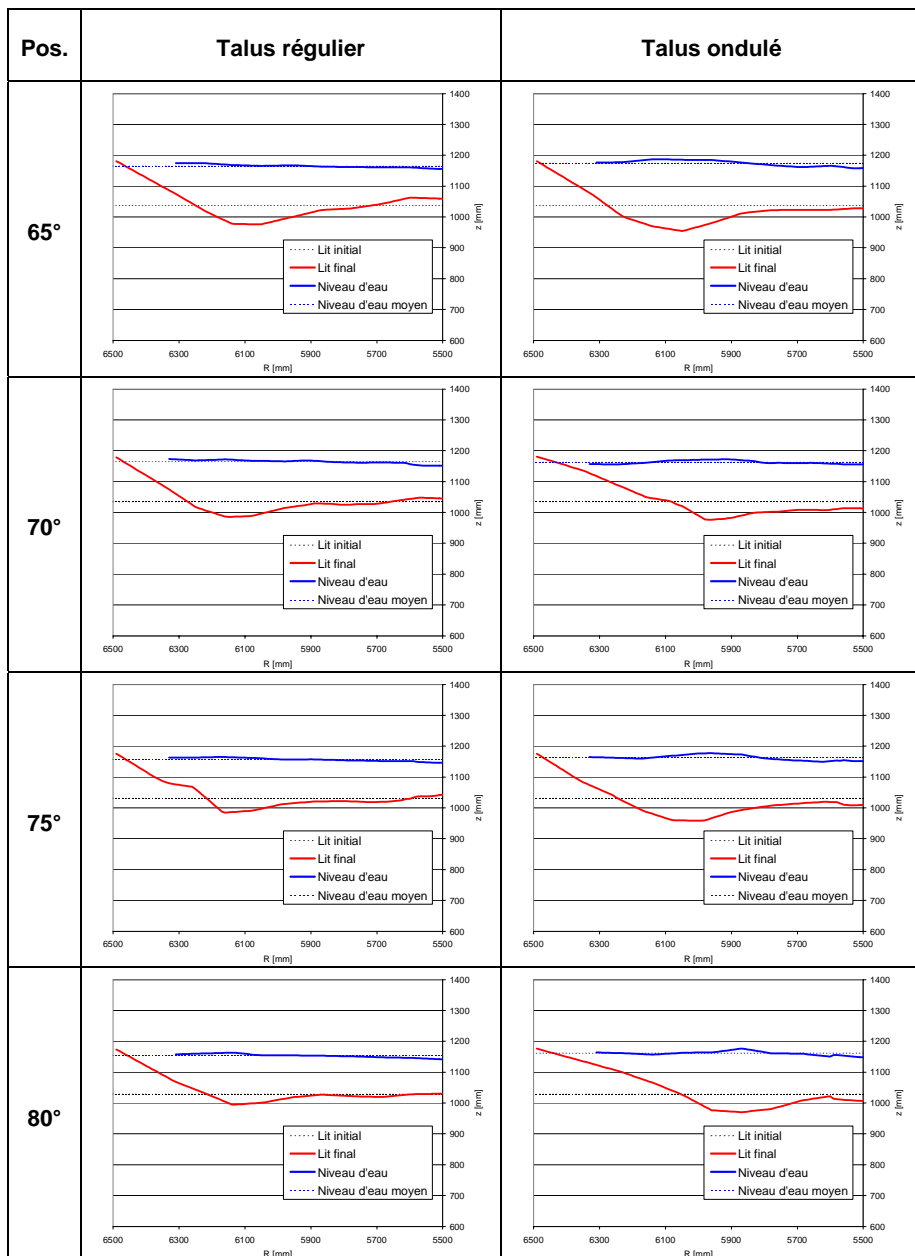


Tableau 72: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

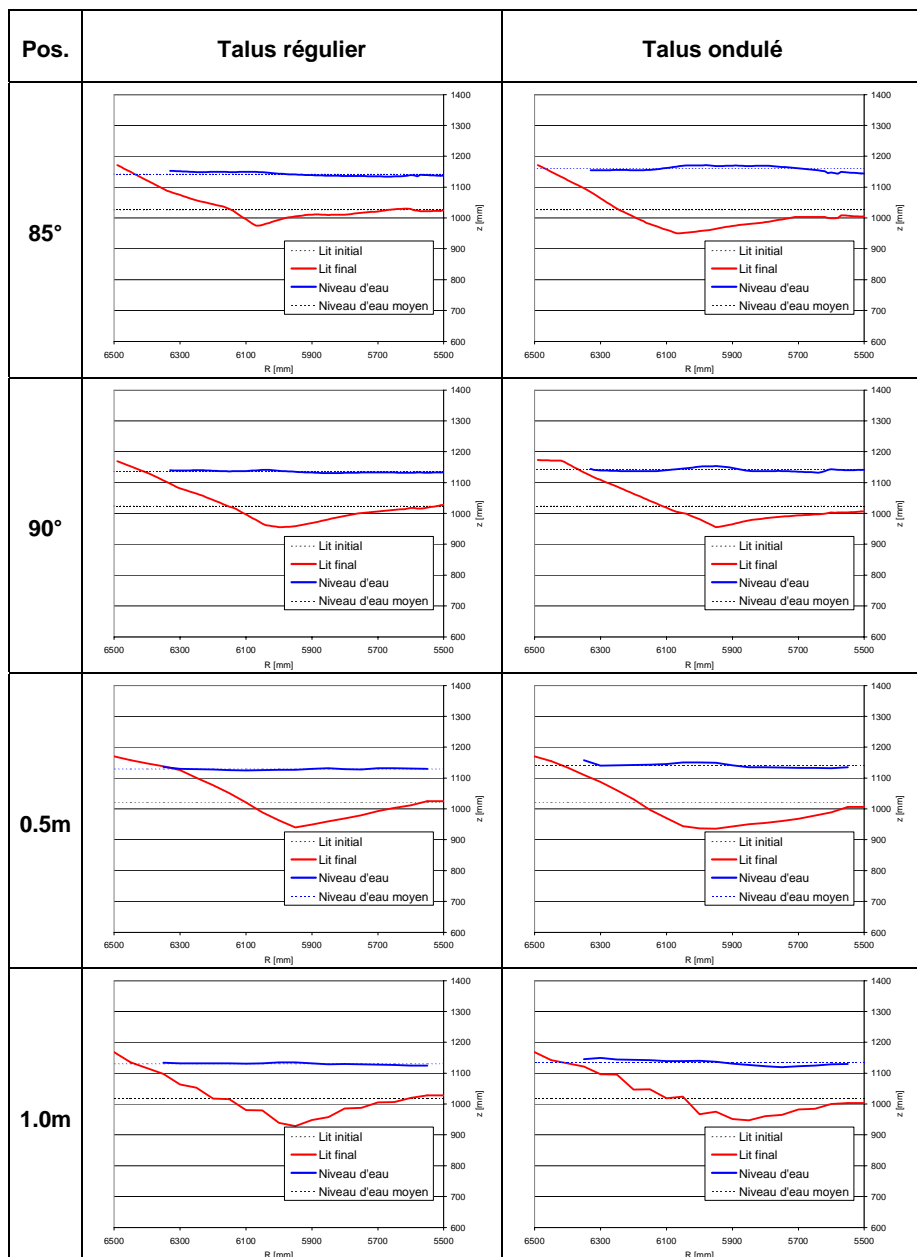


Tableau 73: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

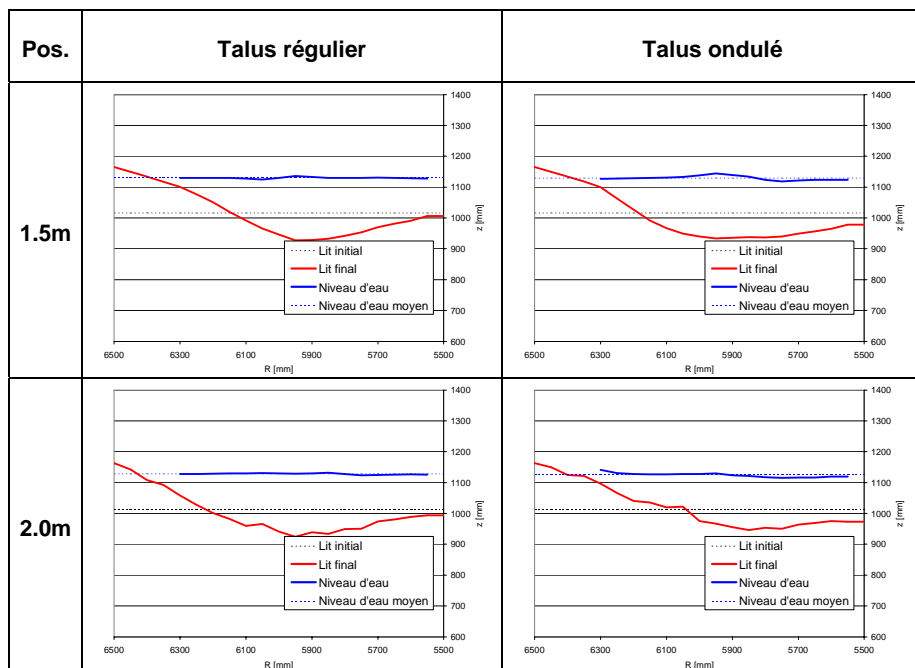


Tableau 74: Profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A8: Comparaison des profils en travers

Annexe A8.1: Comparaison des profils en travers, $Q = 70 \text{ l/s}$

Annexe A8.2: Comparaison des profils en travers, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A8.3: Comparaison des profils en travers, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A8.1: Comparaison des profils en travers, Q = 70 l/s

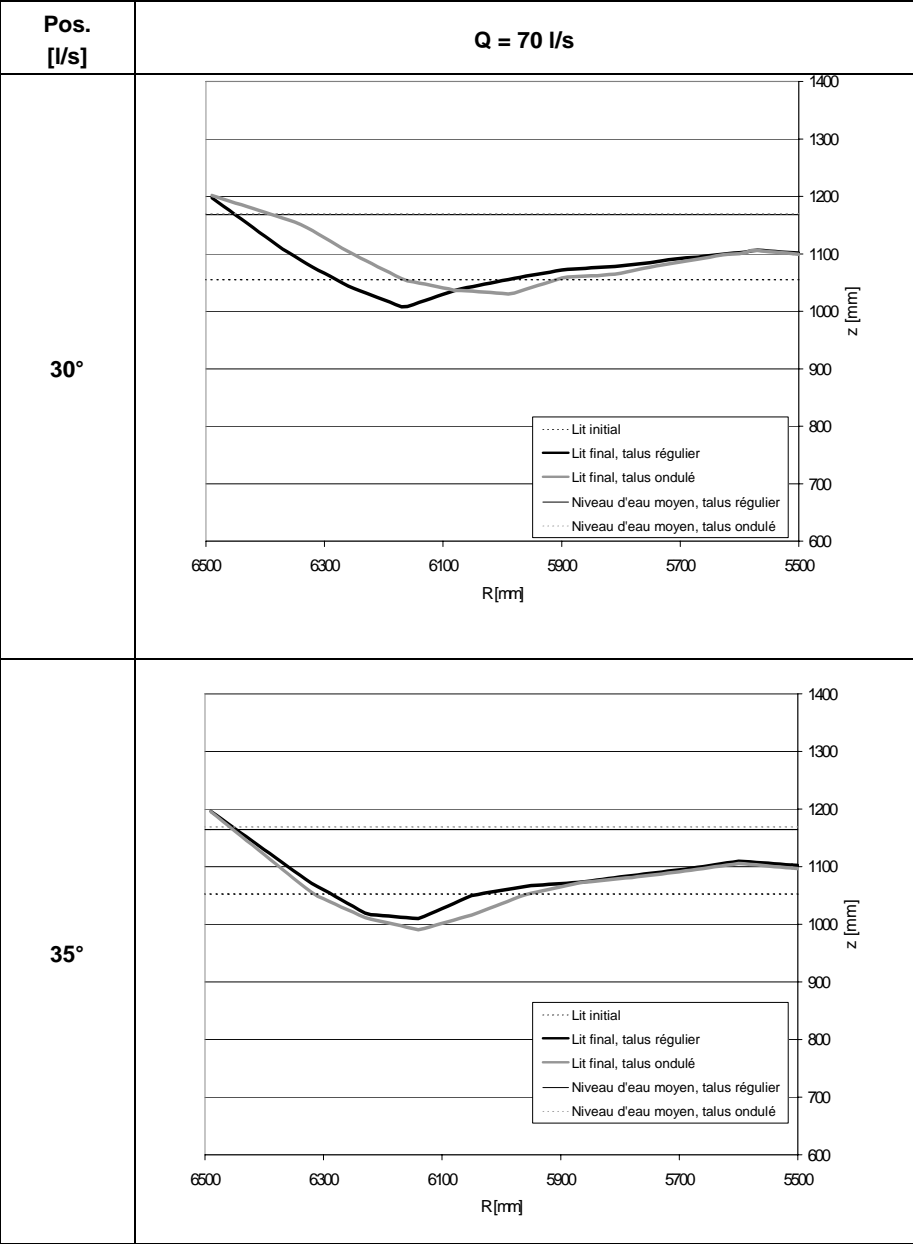


Tableau 75: Comparaison des profils en travers, Q =70 l/s

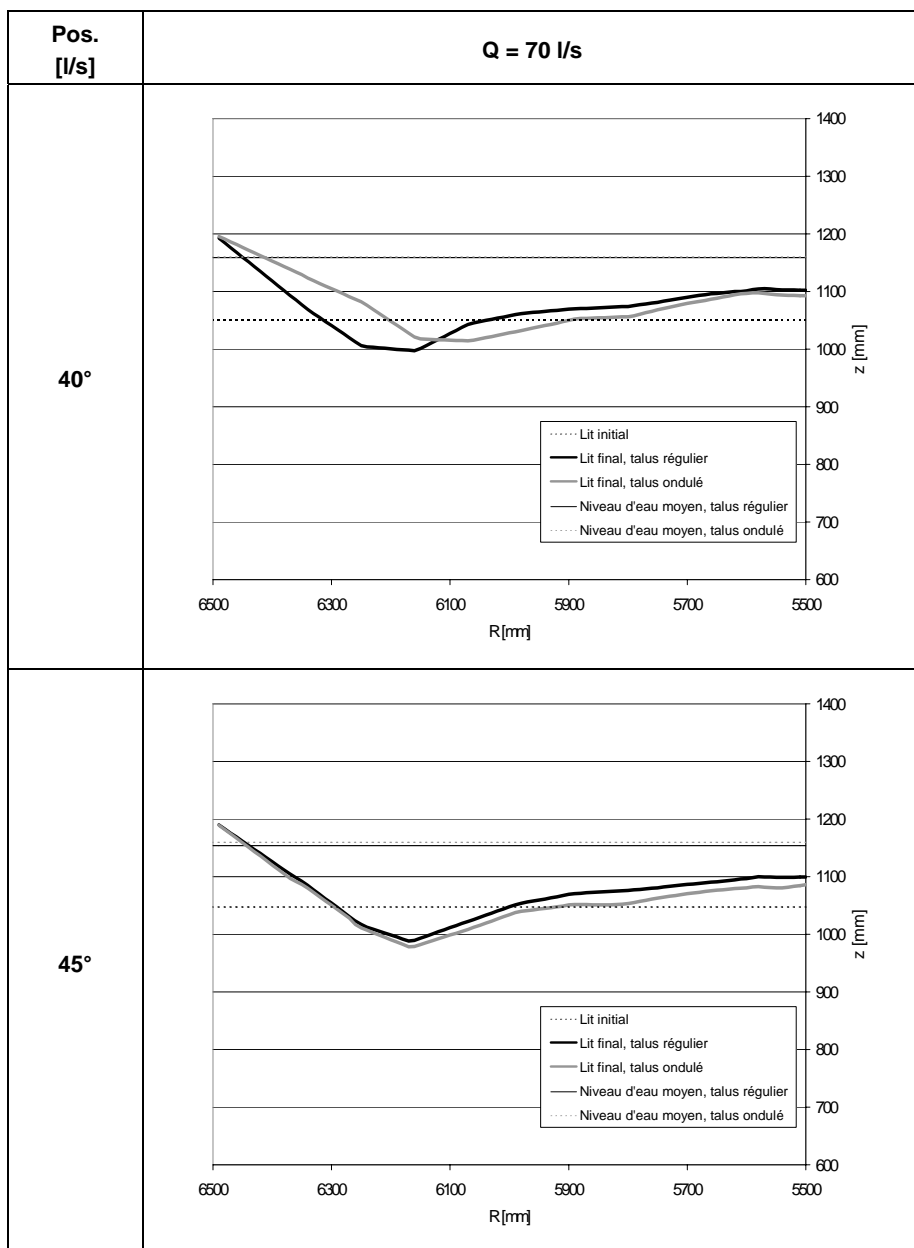


Tableau 76: Comparaison des profils en travers, Q = 70 l/s

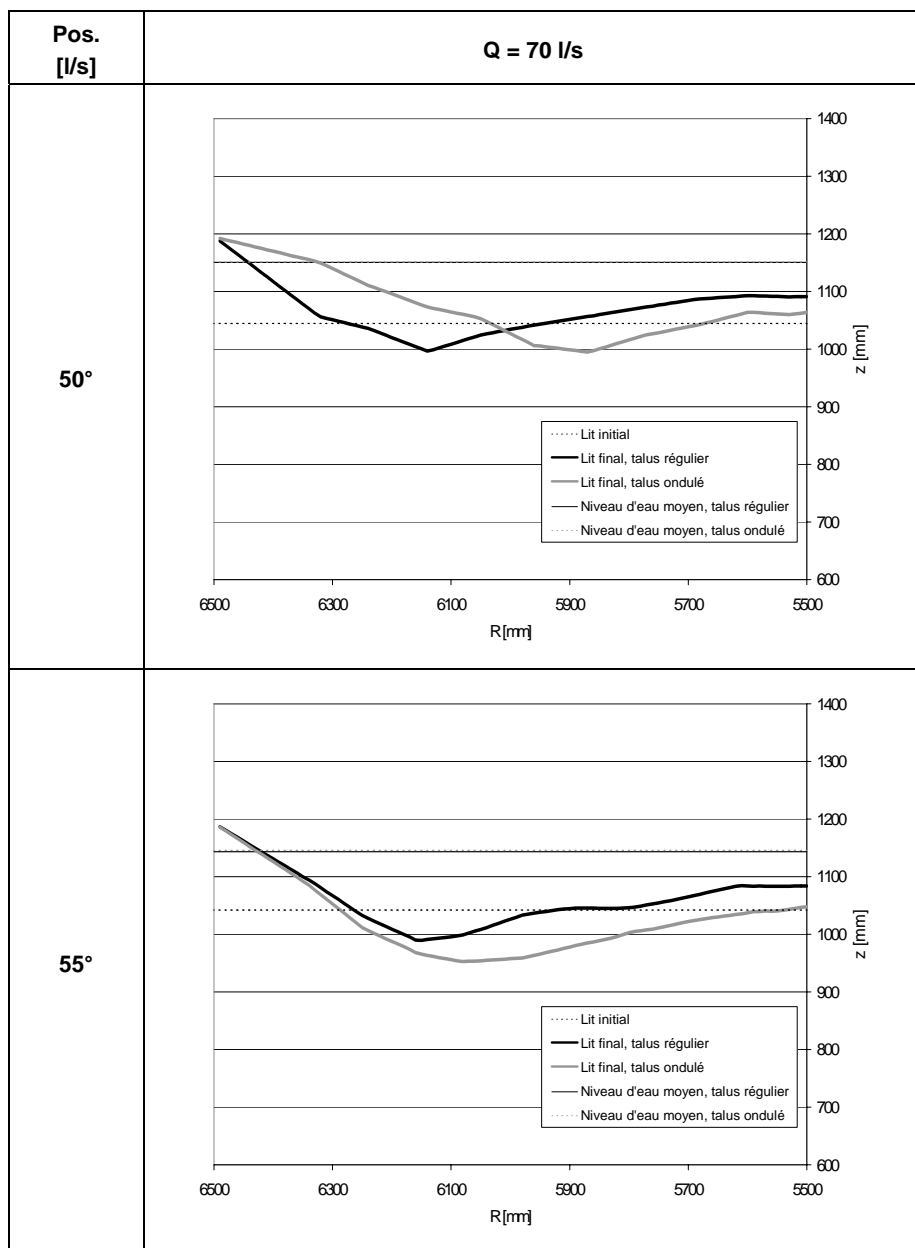


Tableau 77: Comparaison des profils en travers, Q = 70 l/s

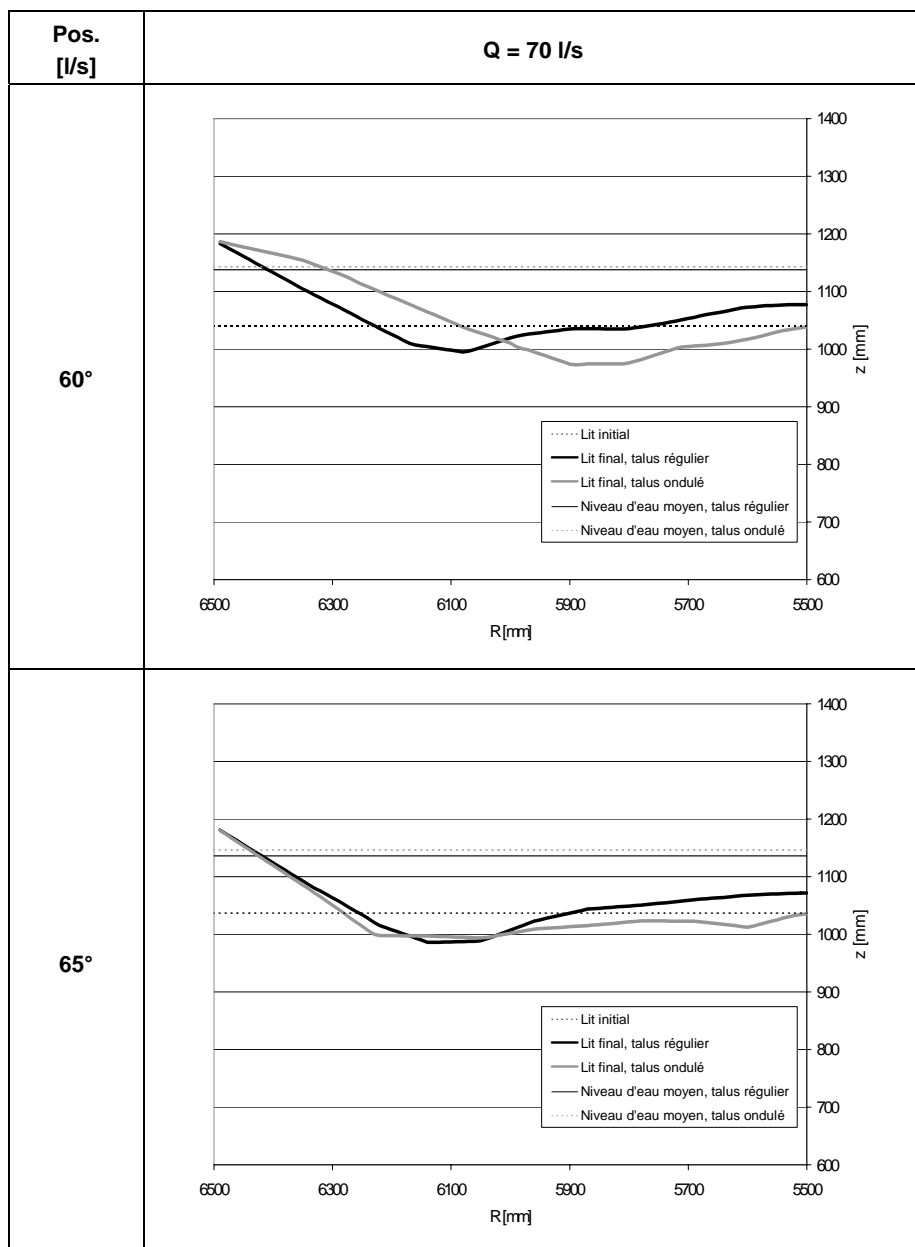


Tableau 78: Comparaison des profils en travers, Q = 70 l/s

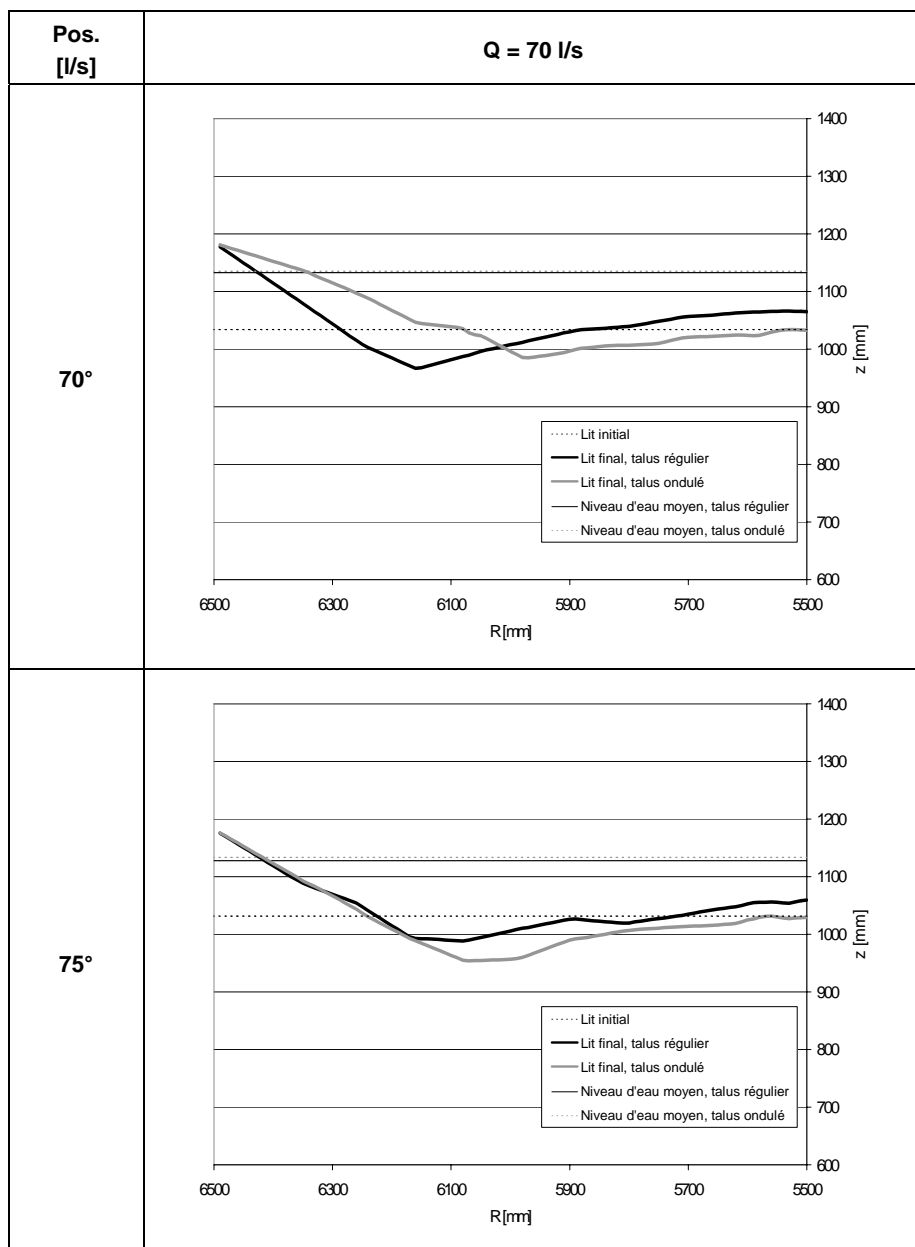


Tableau 79: Comparaison des profils en travers, Q = 70 l/s

Annexe A8.2: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

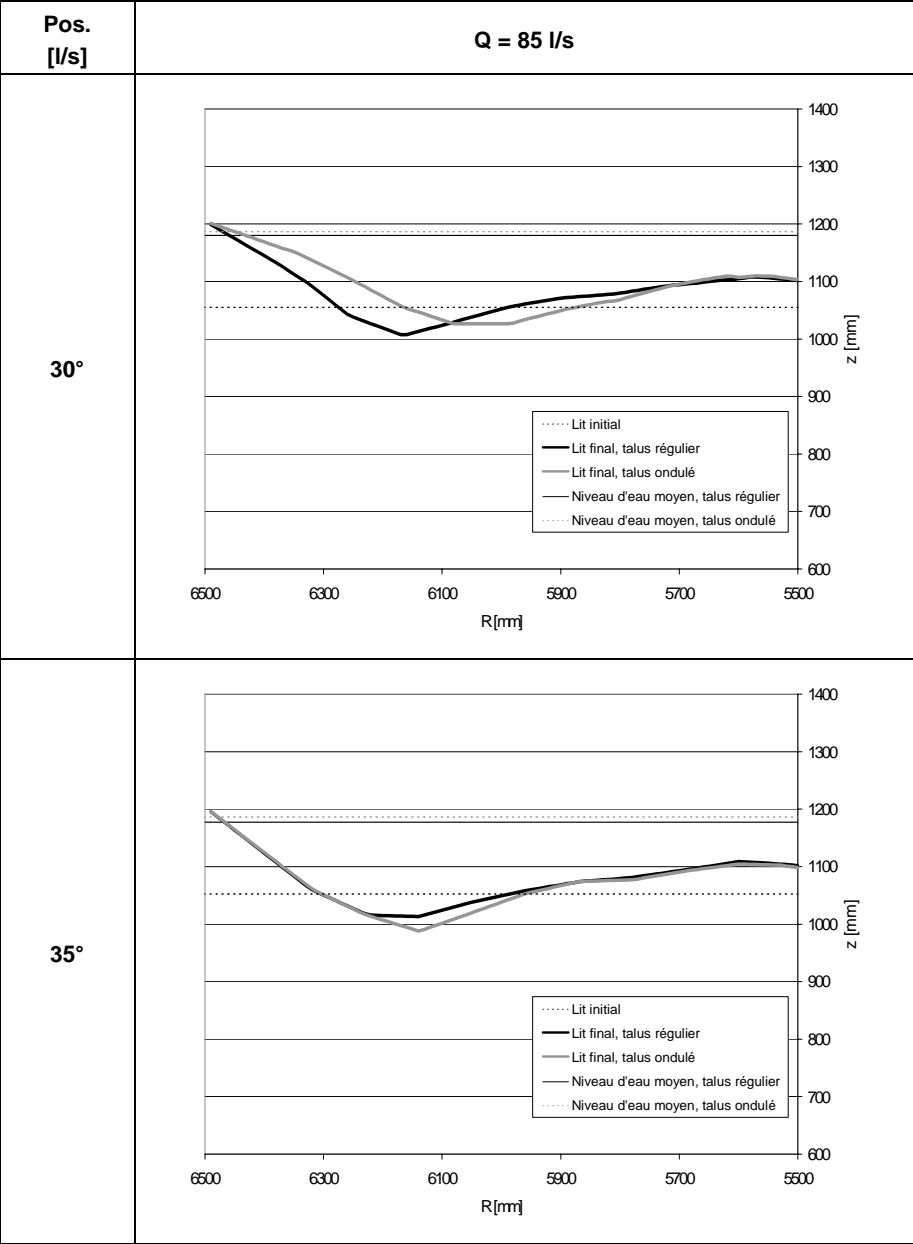


Tableau 80: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

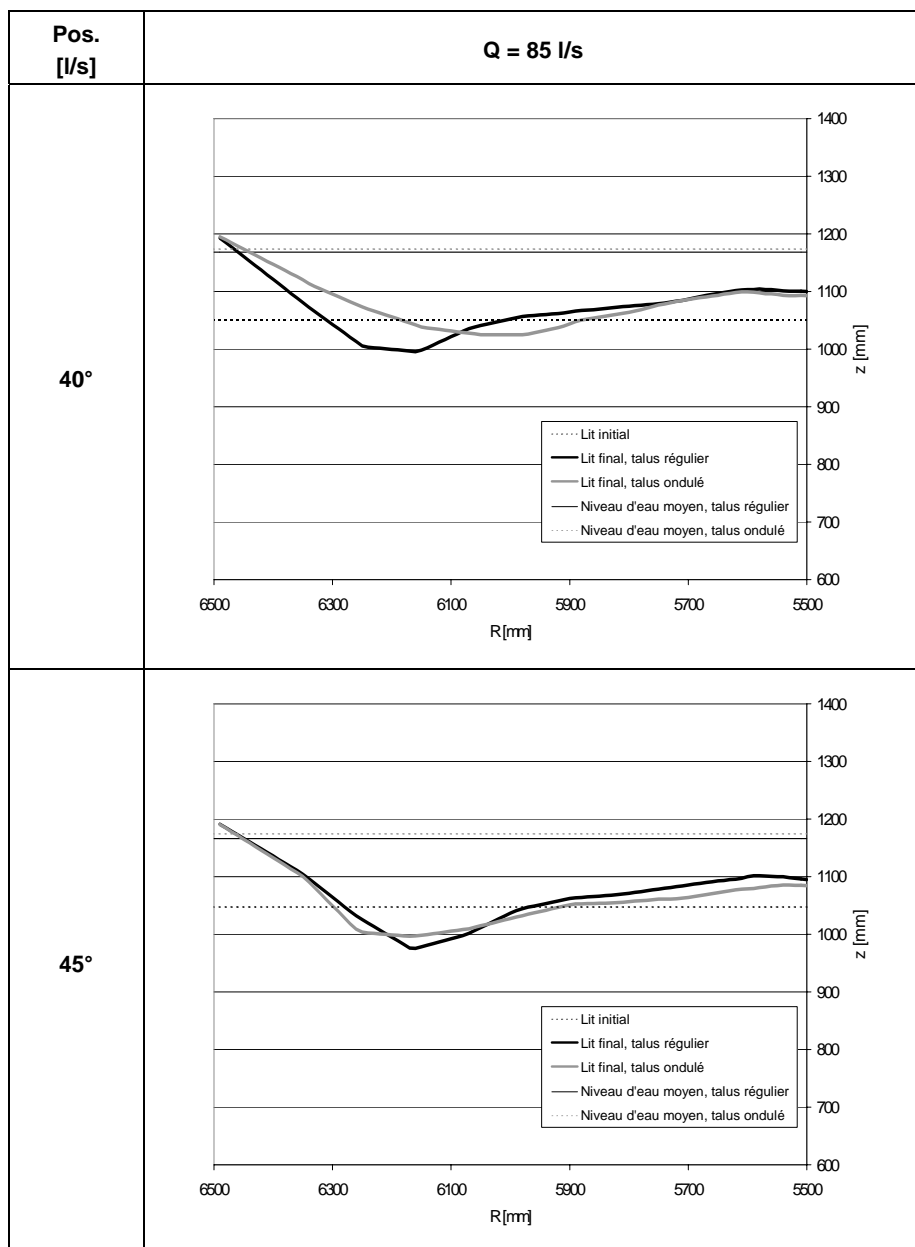


Tableau 81: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

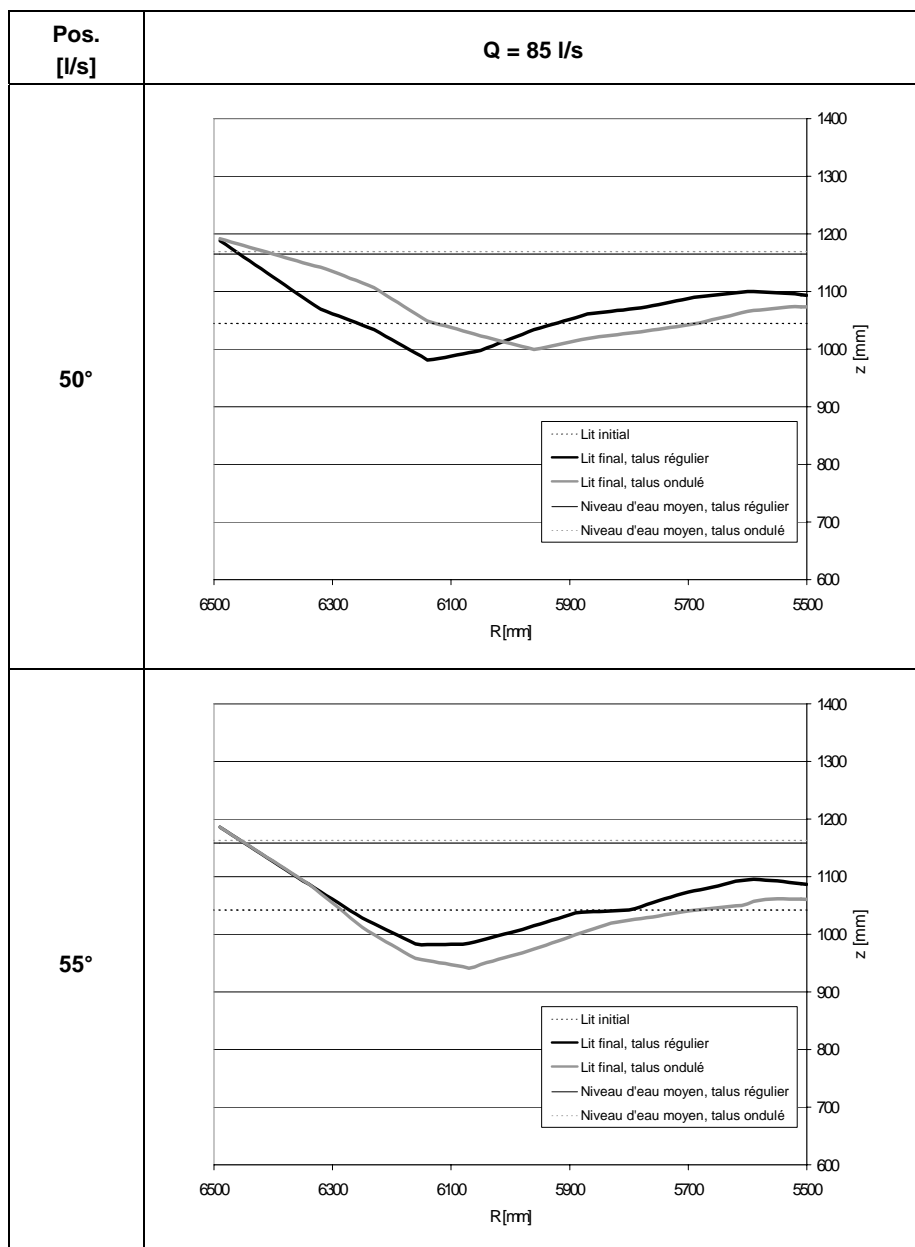


Tableau 82: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

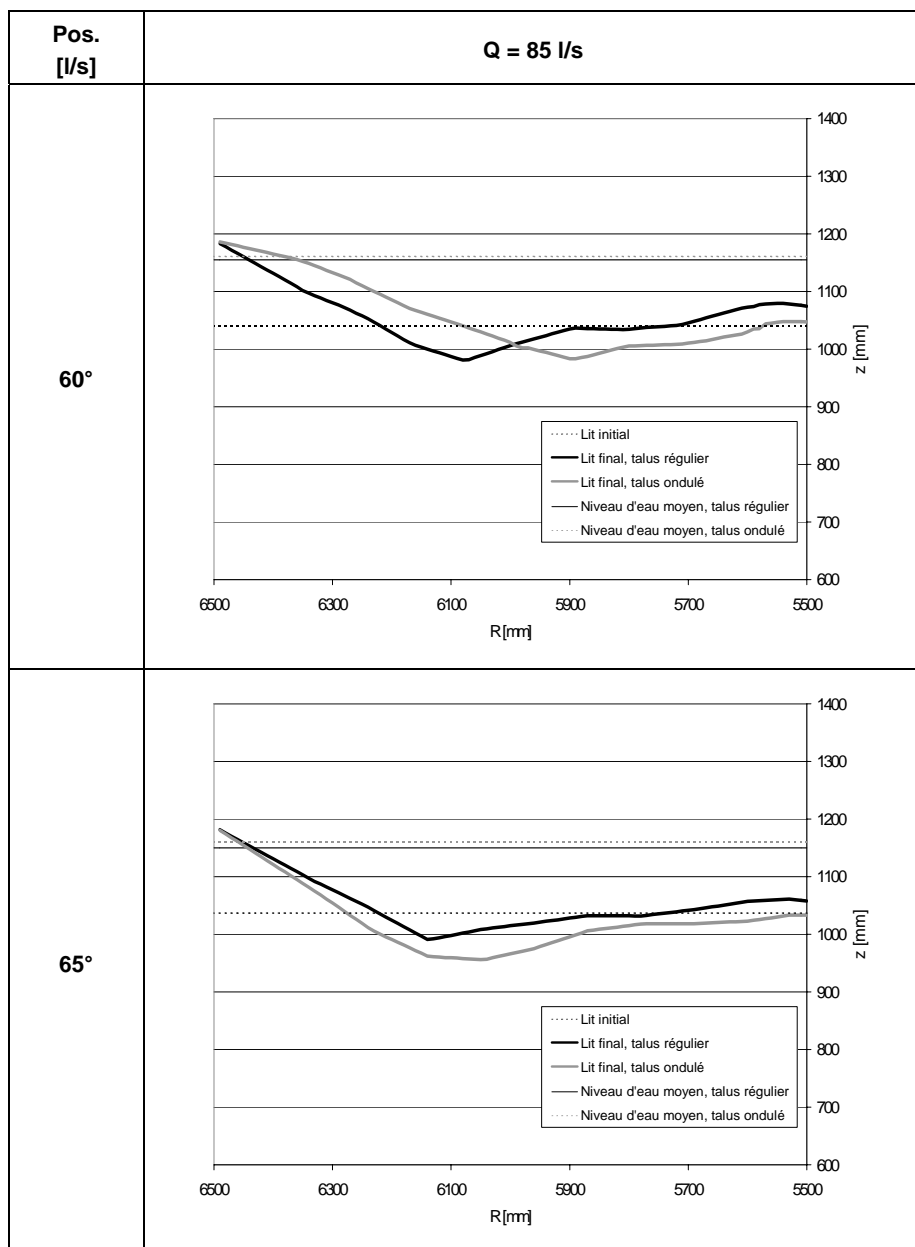


Tableau 83: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

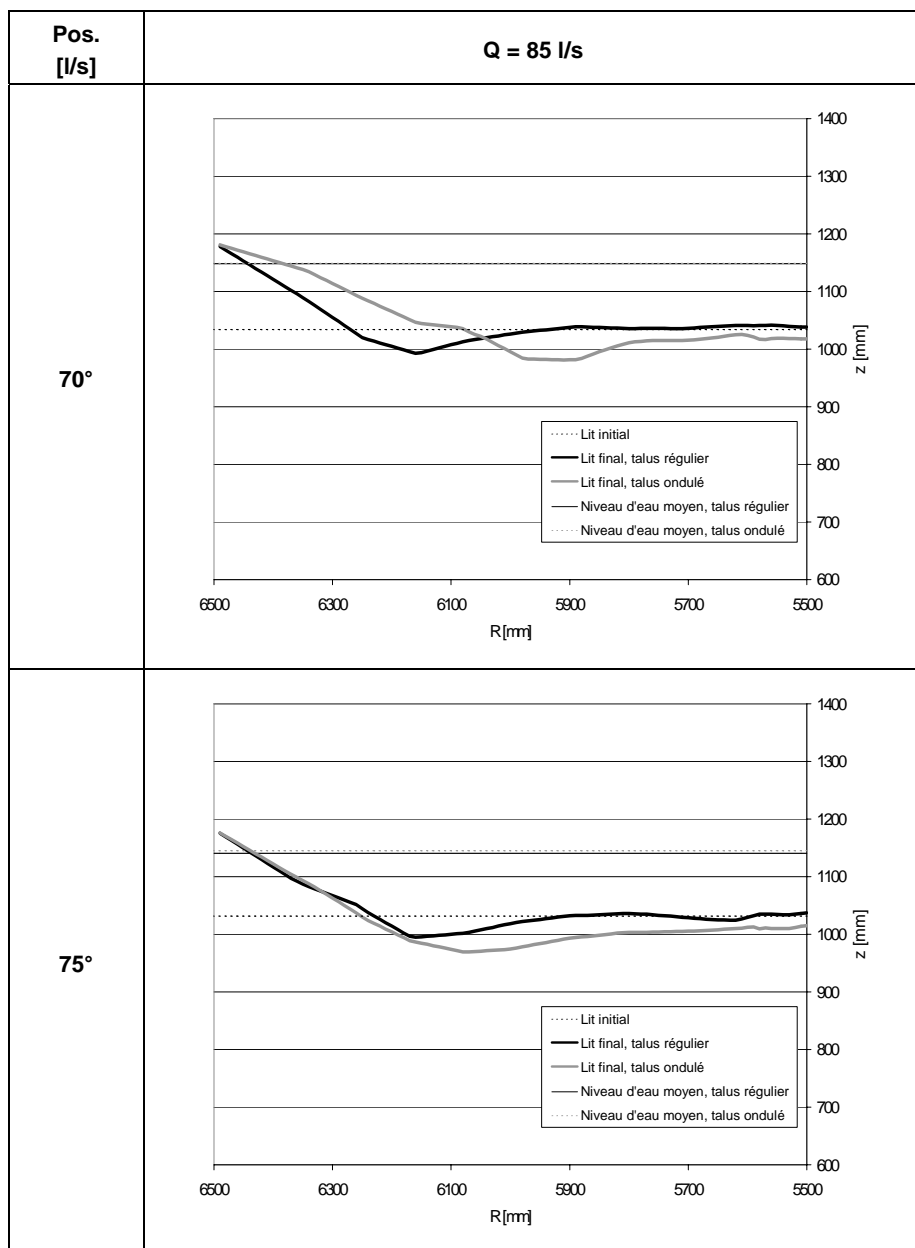


Tableau 84: Comparaison des profils en travers, Q = 85 l/s

Annexe A8.3: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

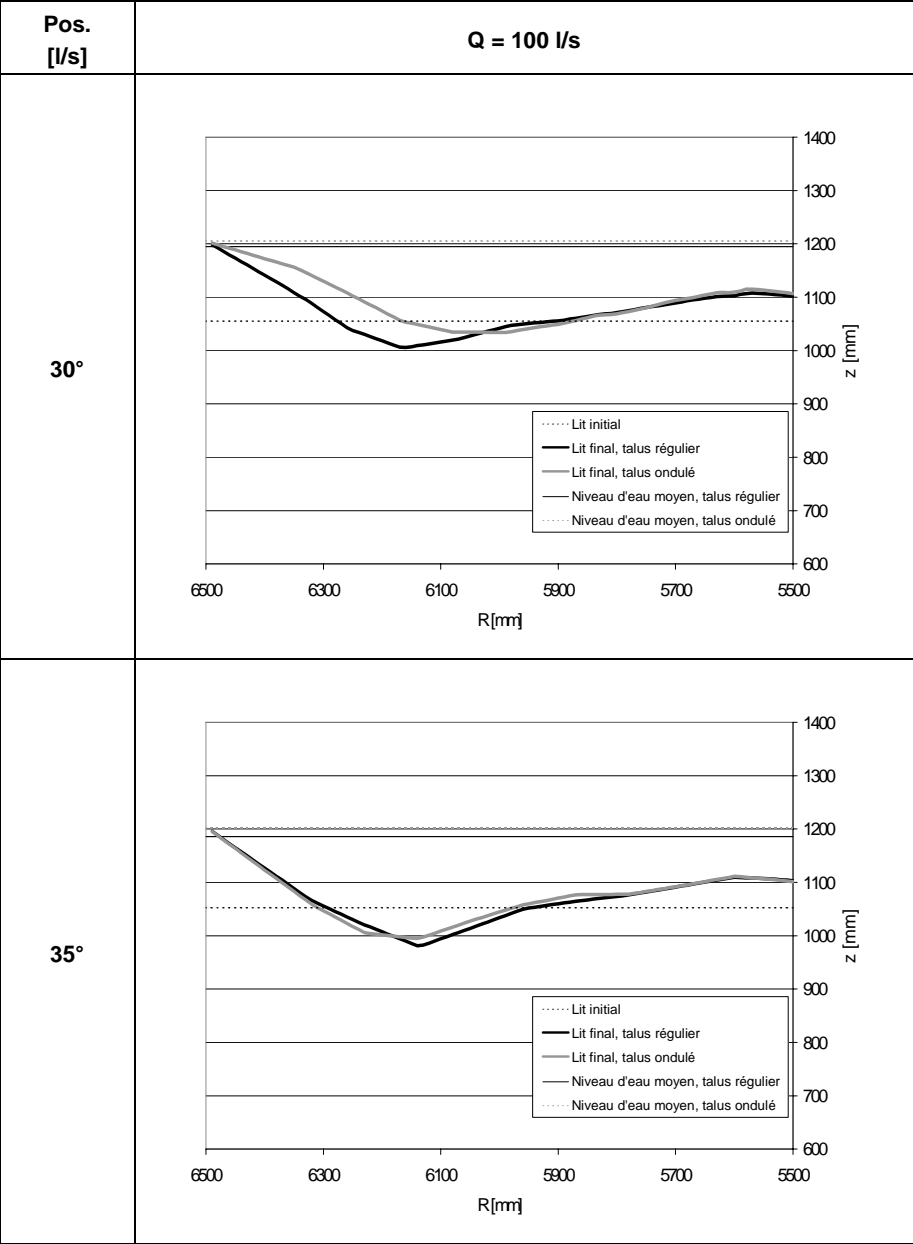


Tableau 85: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

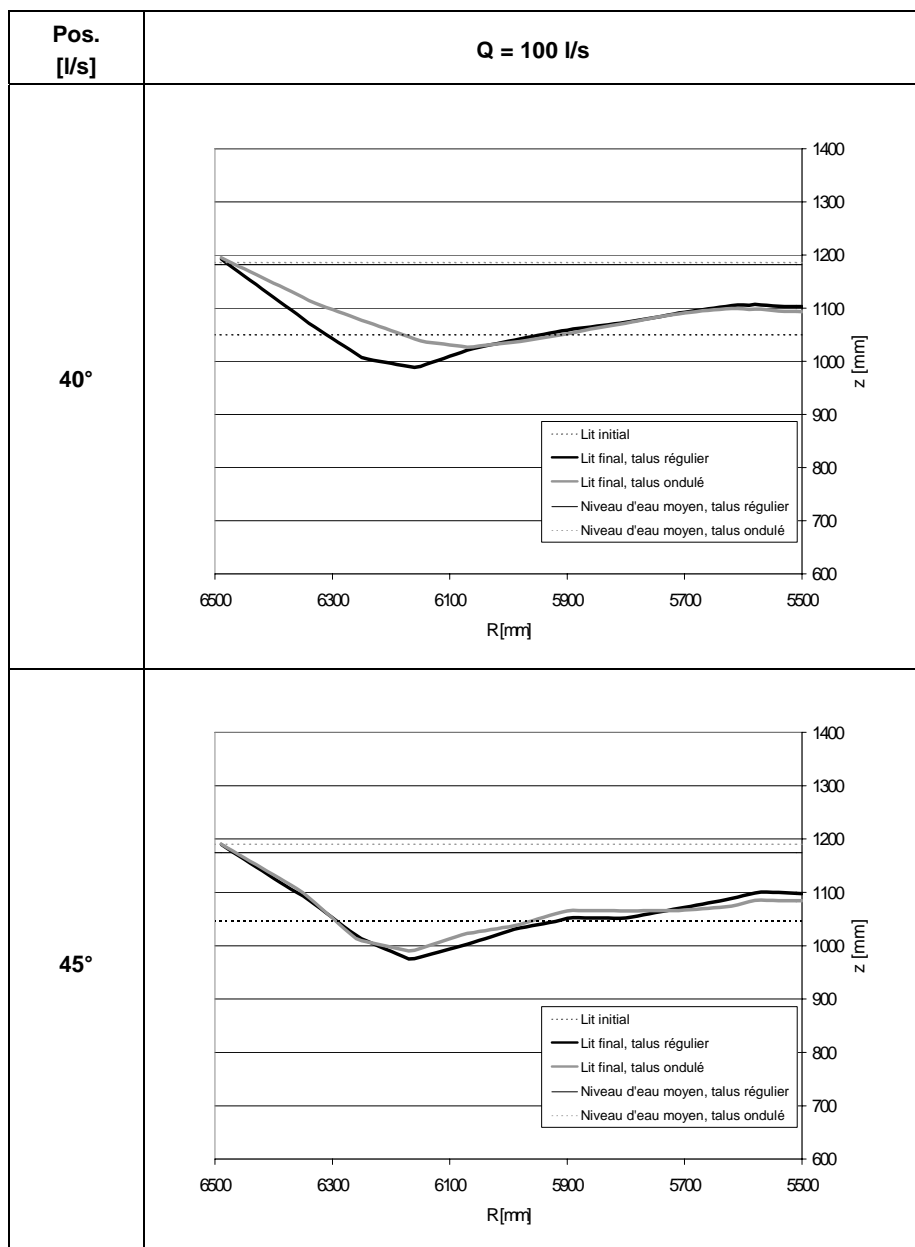


Tableau 86: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

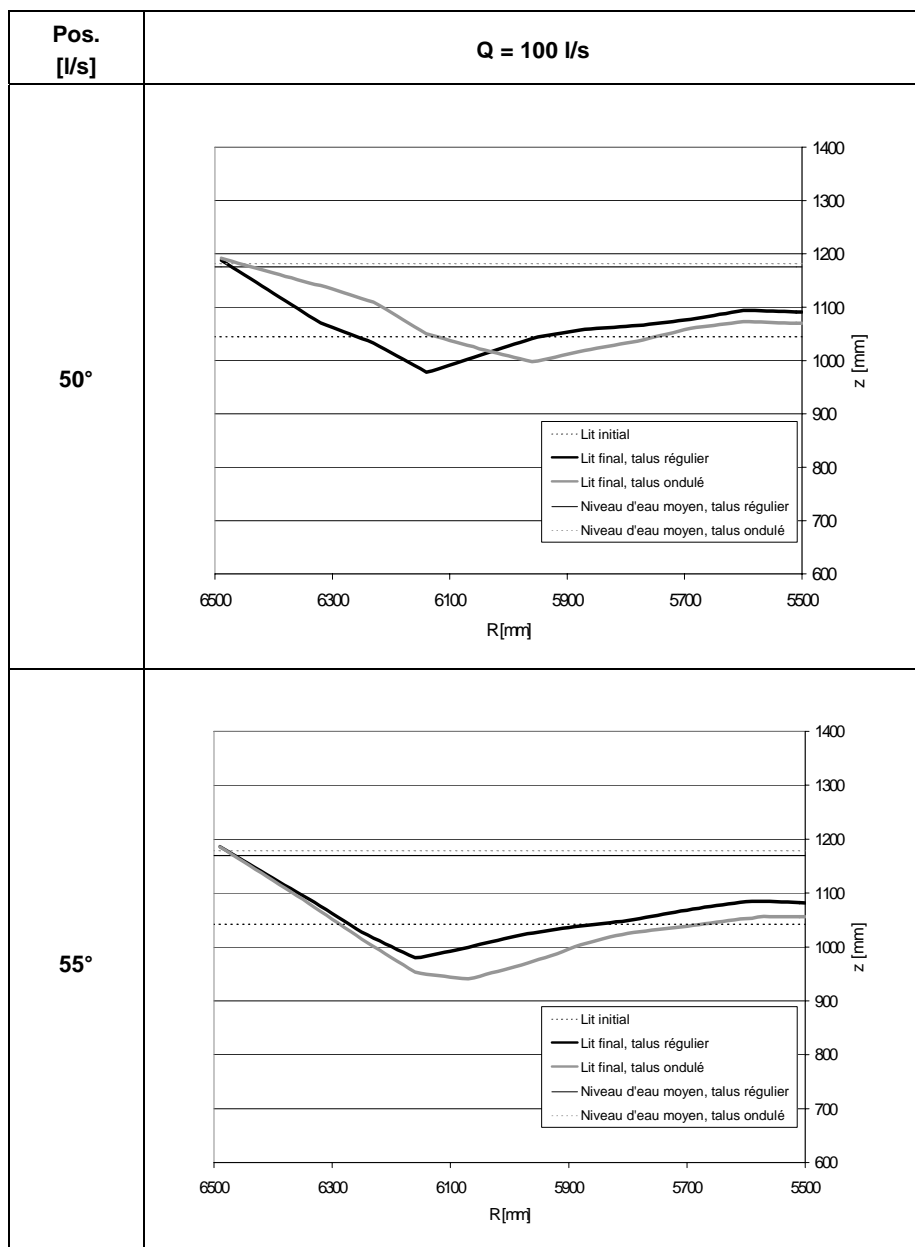


Tableau 87: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

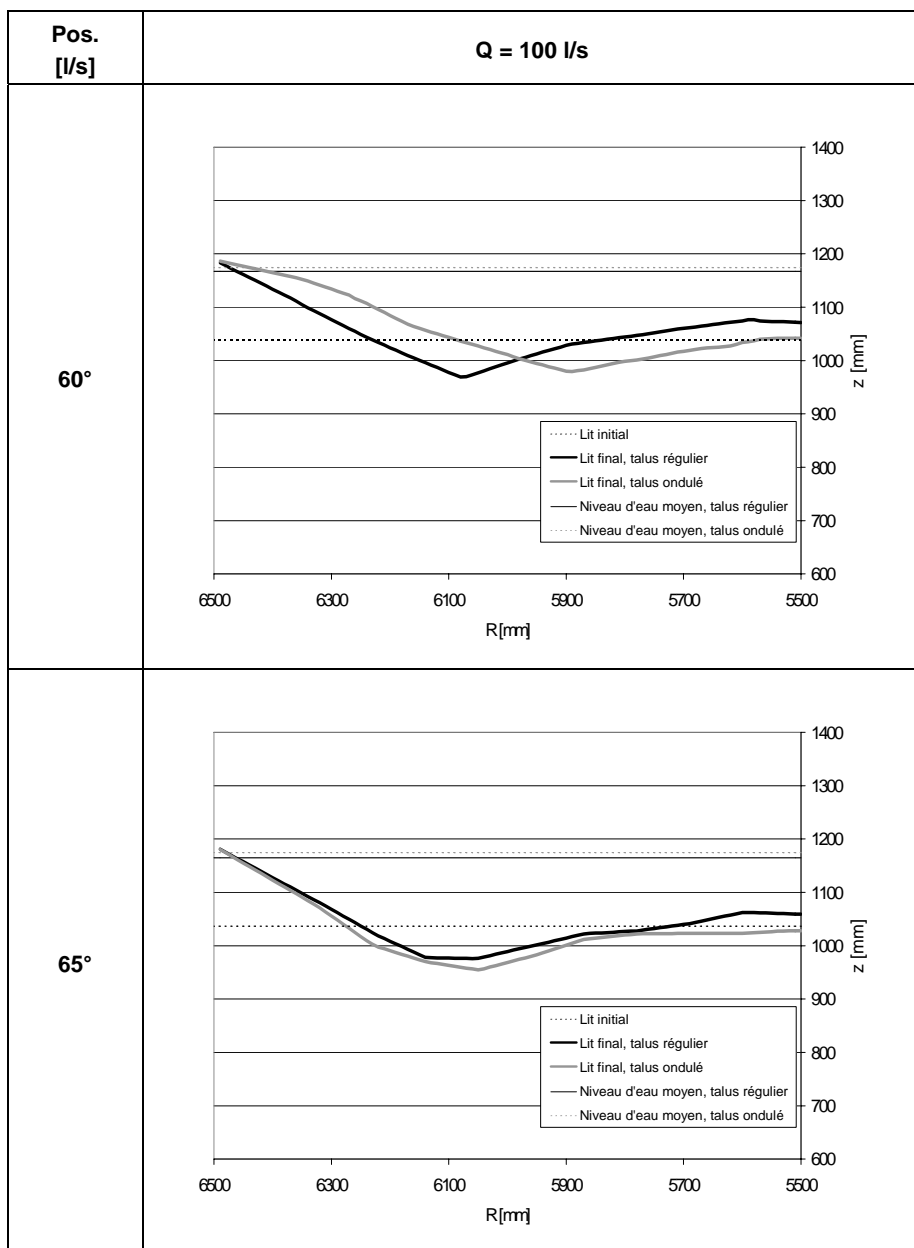


Tableau 88: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

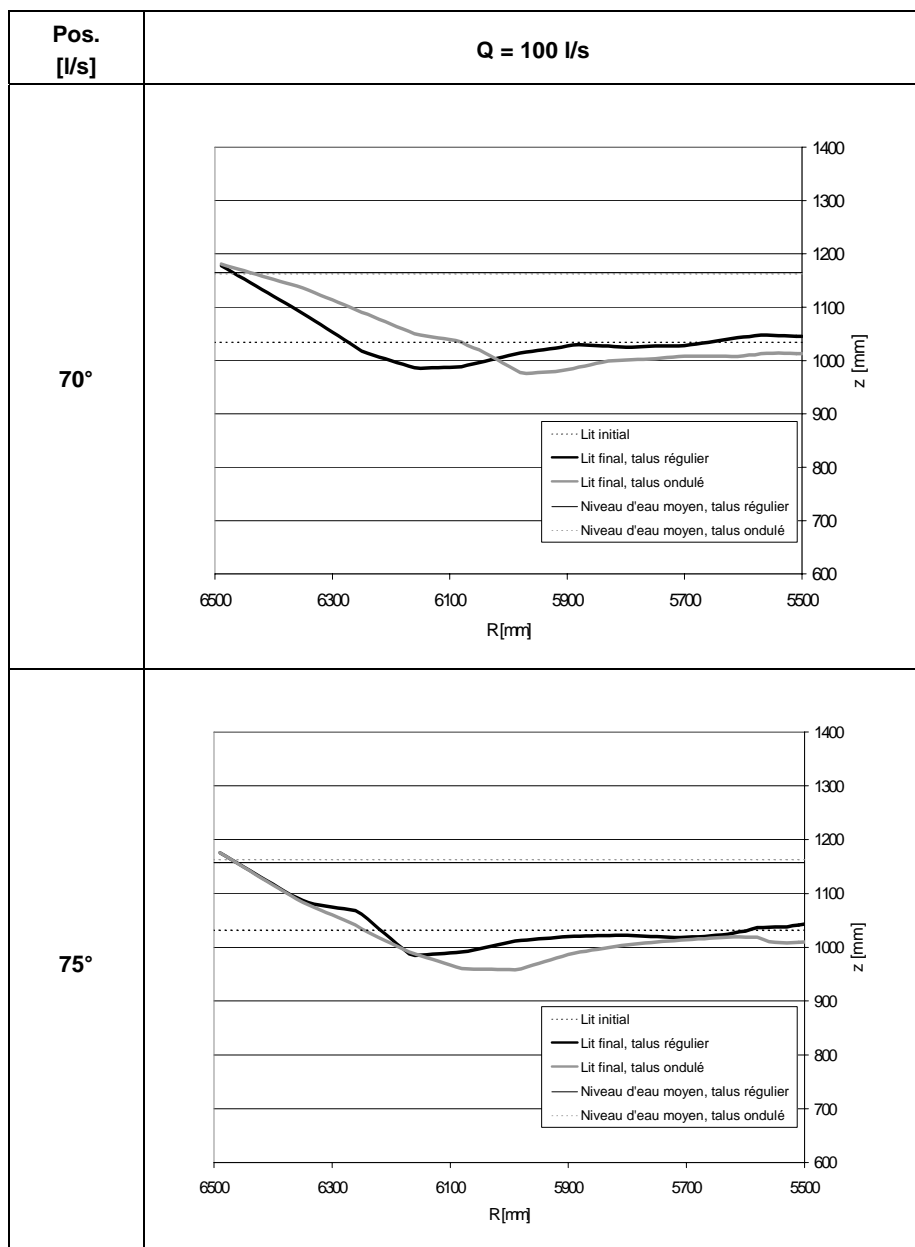


Tableau 89: Comparaison des profils en travers, Q = 100 l/s

Annexe A9: Niveaux d'eau

Annexe A9.1: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs absolues

Annexe A9.2: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs relatives

Annexe A9.3: Pente longitudinale de la surface d'eau, $R = 6100 \text{ mm}$

Annexe A9.1: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs absolues

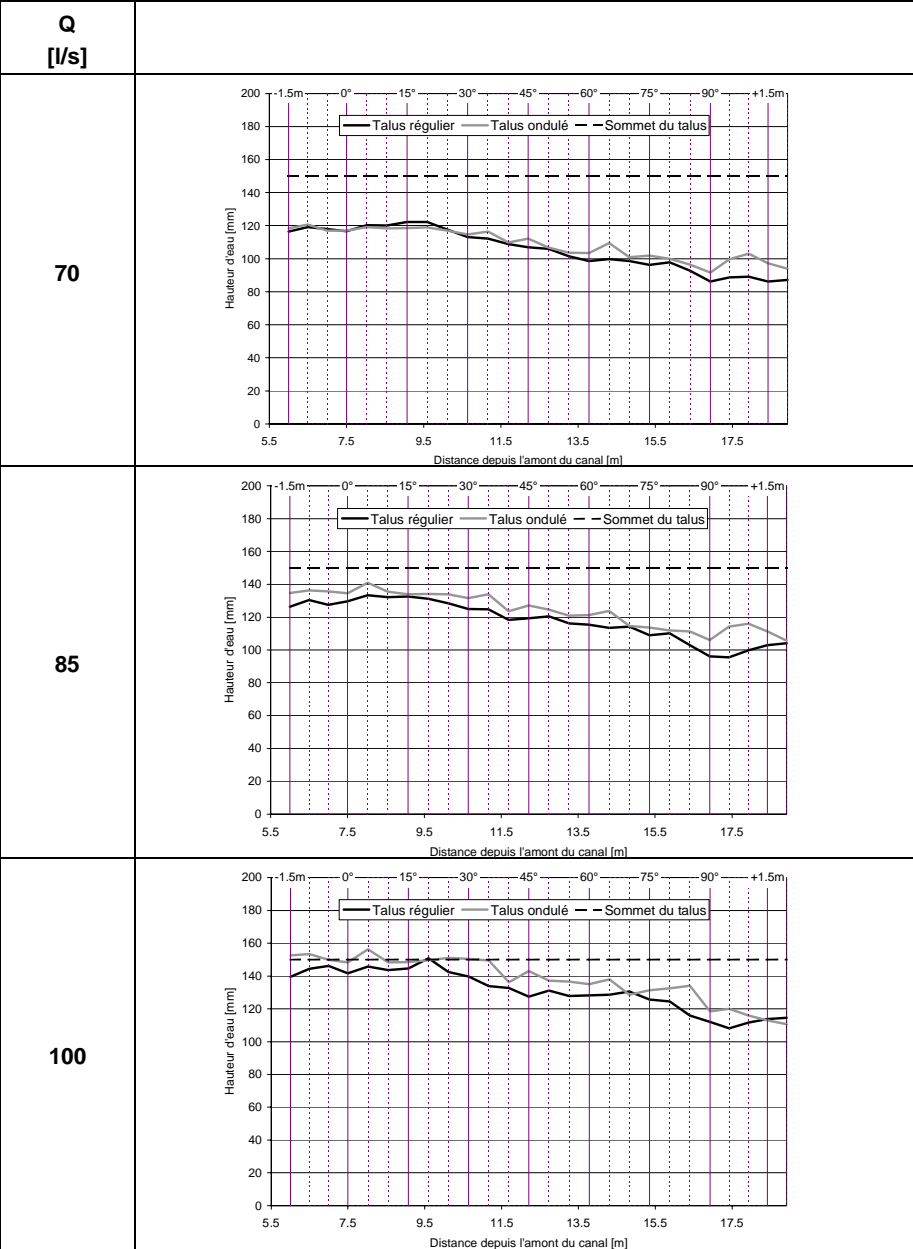


Tableau 90: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs absolues

Annexe A9.2: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs relatives

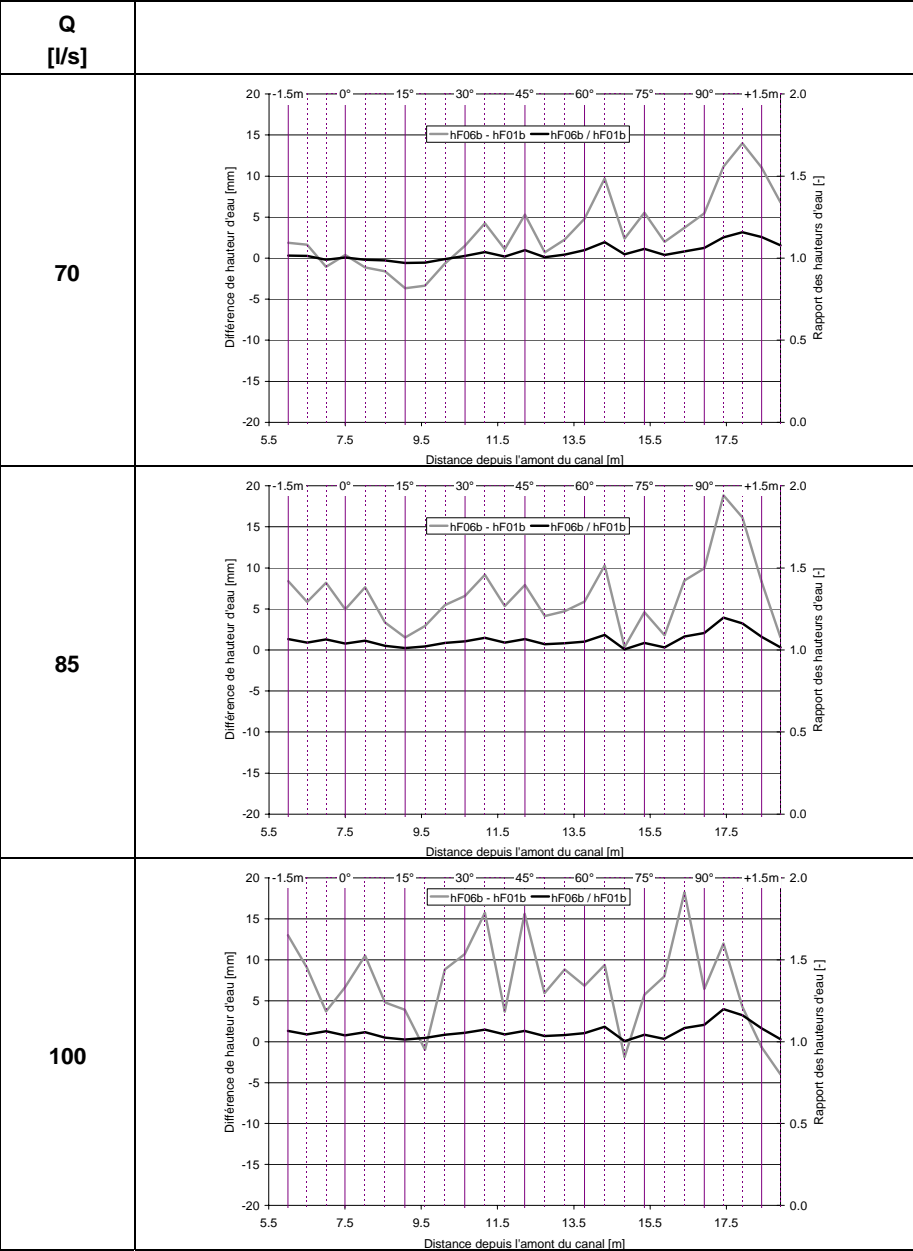


Tableau 91: Comparaison des niveaux d'eau moyens, valeurs relatives

Annexe A9.3: Pente longitudinale de la surface d'eau, R = 6100 mm

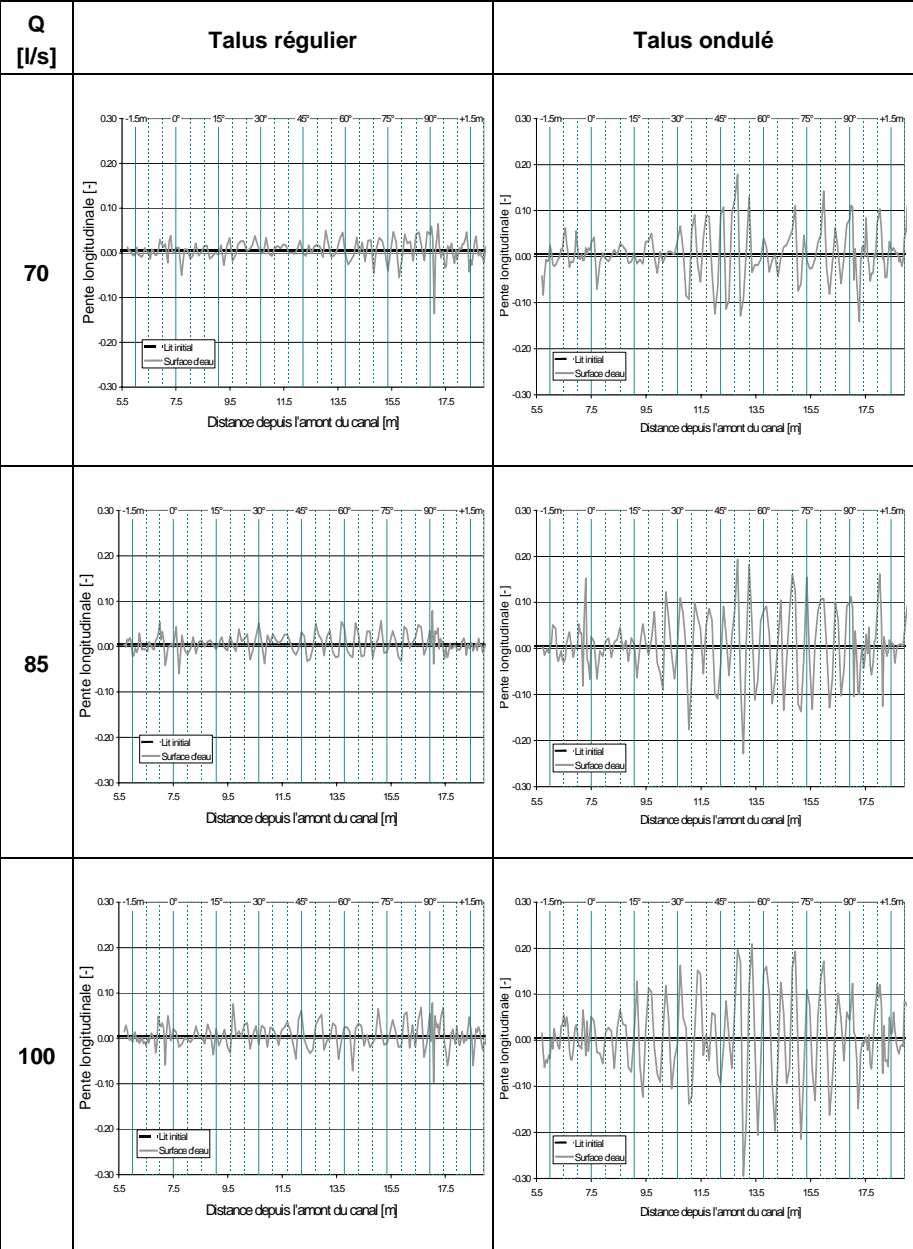


Tableau 92: Pente longitudinale de la surface d'eau, R = 6100 mm

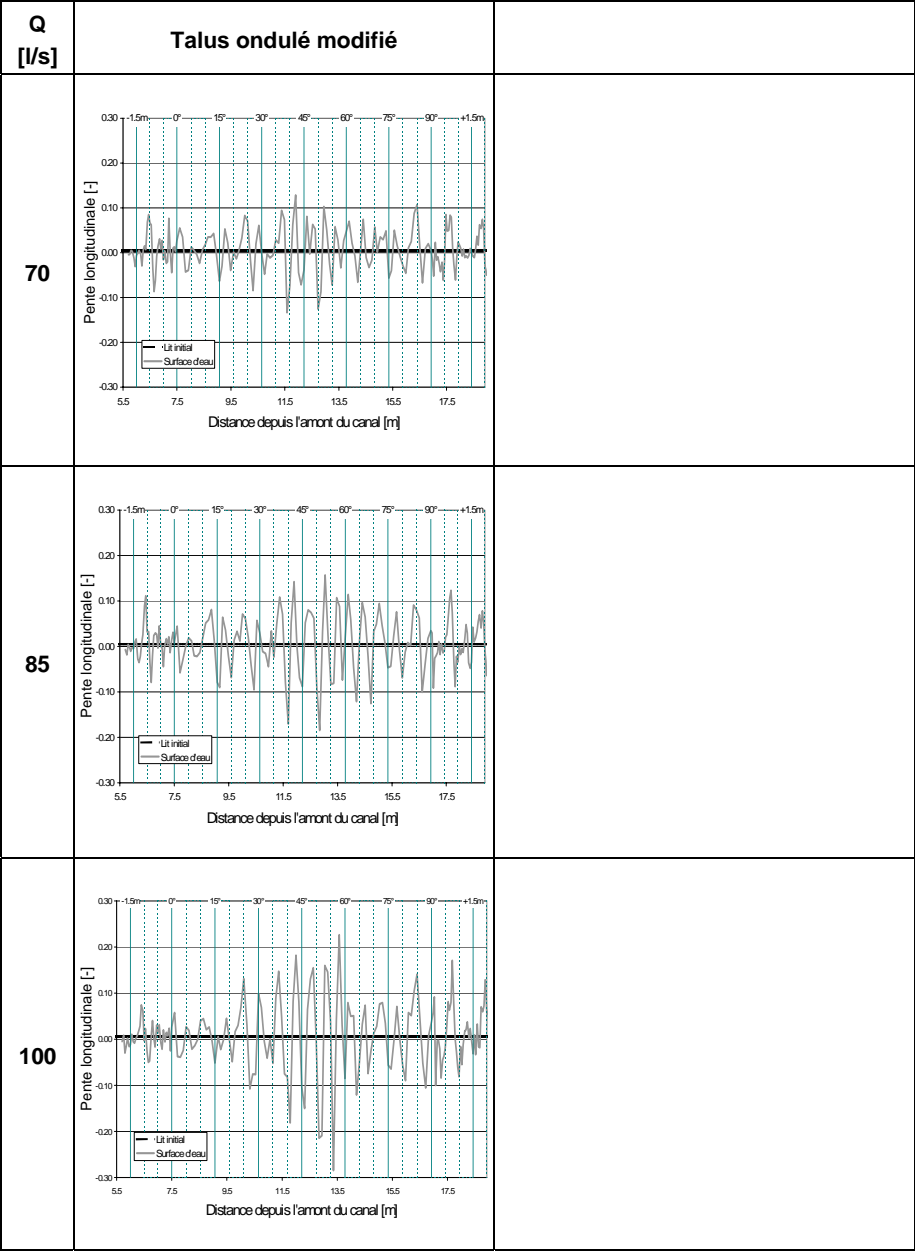


Tableau 93: Pente longitudinale de la surface d'eau, R = 6100 mm

Annexe A10: Profils en long, rayon variable

Annexe A10.1: Profils en long, R = 5800 mm

Annexe A10.2: Profils en long, R = 5900 mm

Annexe A10.3: Profils en long, R = 6000 mm (axe du canal)

Annexe A10.4: Profils en long, R = 6100 mm

Annexe A10.5: Profils en long, R variable

Annexe A10.1: Profils en long, R = 5800 mm (R = 6000 mm à l'axe)

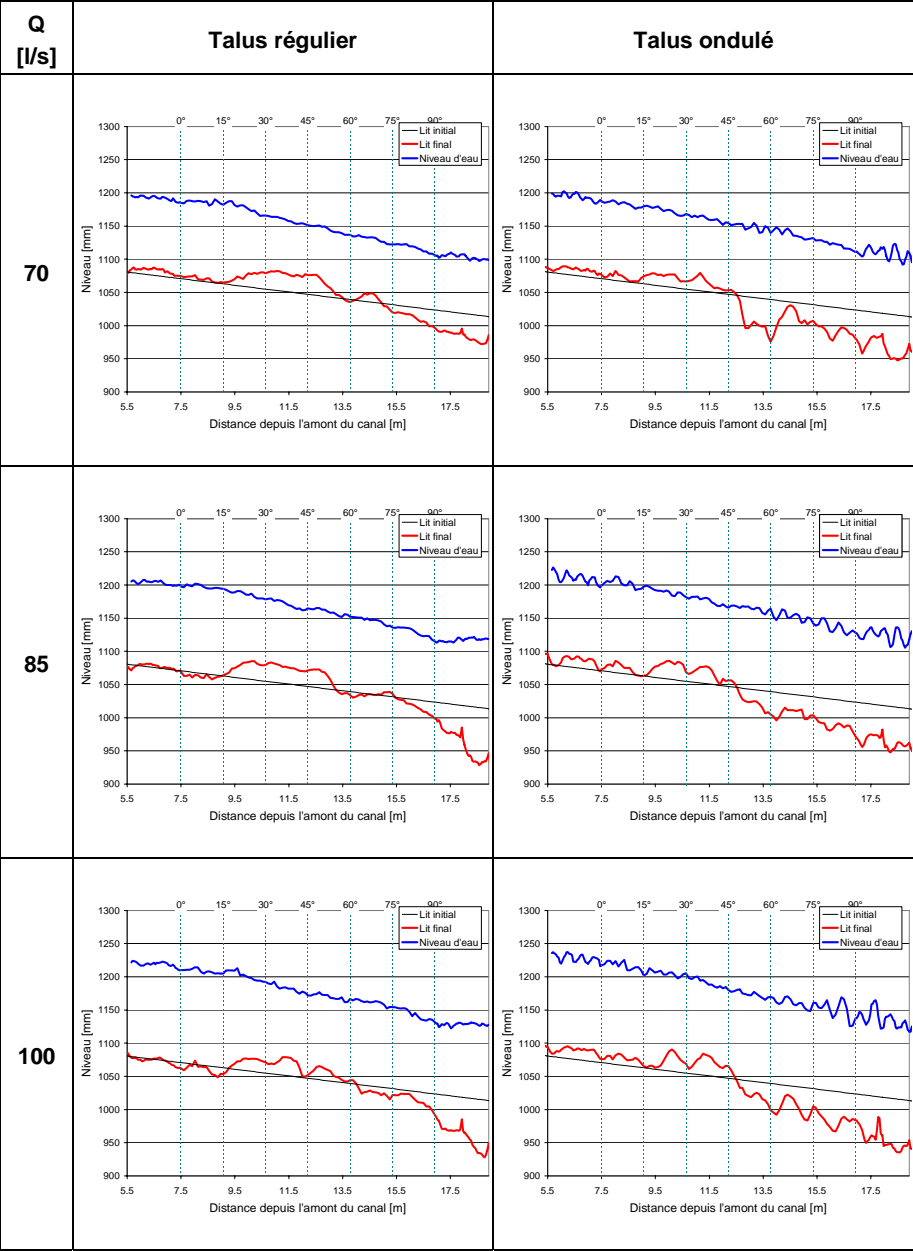


Tableau 94: Profils en long, R = 5800 mm (R = 6000 mm à l'axe)

Annexe A10.2: Profils en long, R = 5900 mm (R = 6000 mm à l'axe)

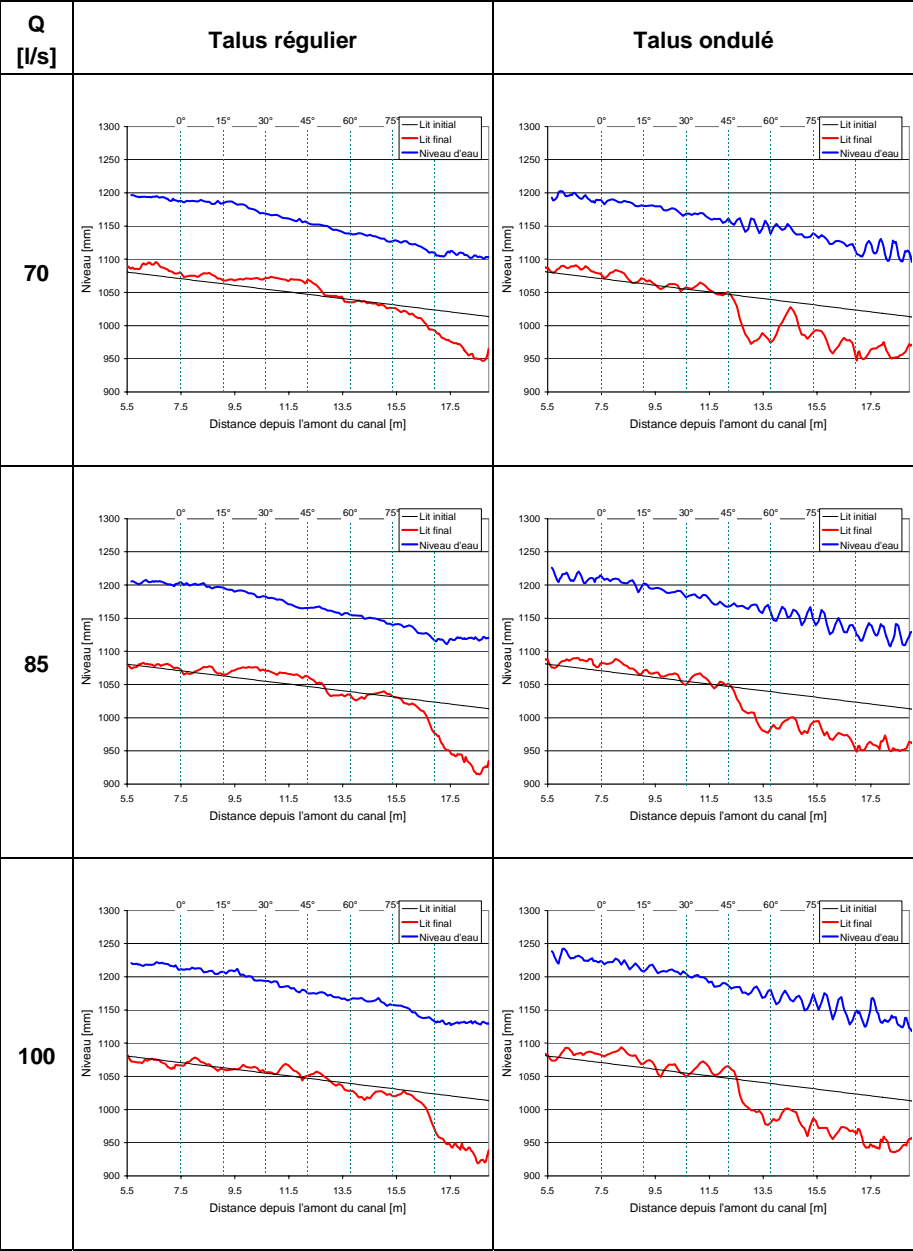


Tableau 95: Profils en long, R = 5900 mm (R = 6000 mm à l'axe)

Annexe A10.3: Profils en long, R = 6000 mm (axe du canal)

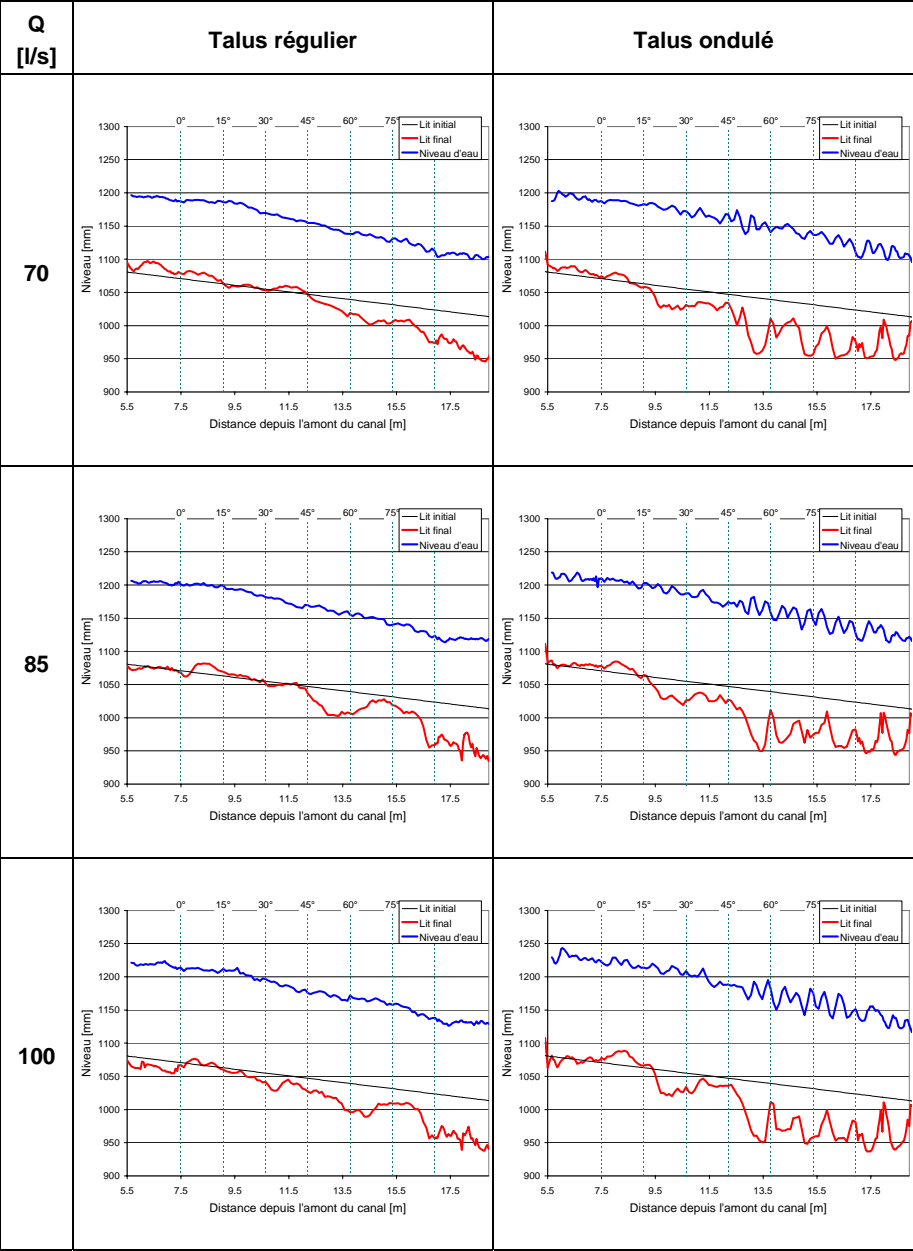


Tableau 96: Profils en long, R = 6000 mm (axe du canal)

Annexe A10.4: Profils en long, R = 6100 mm (R = 6000 mm à l'axe)

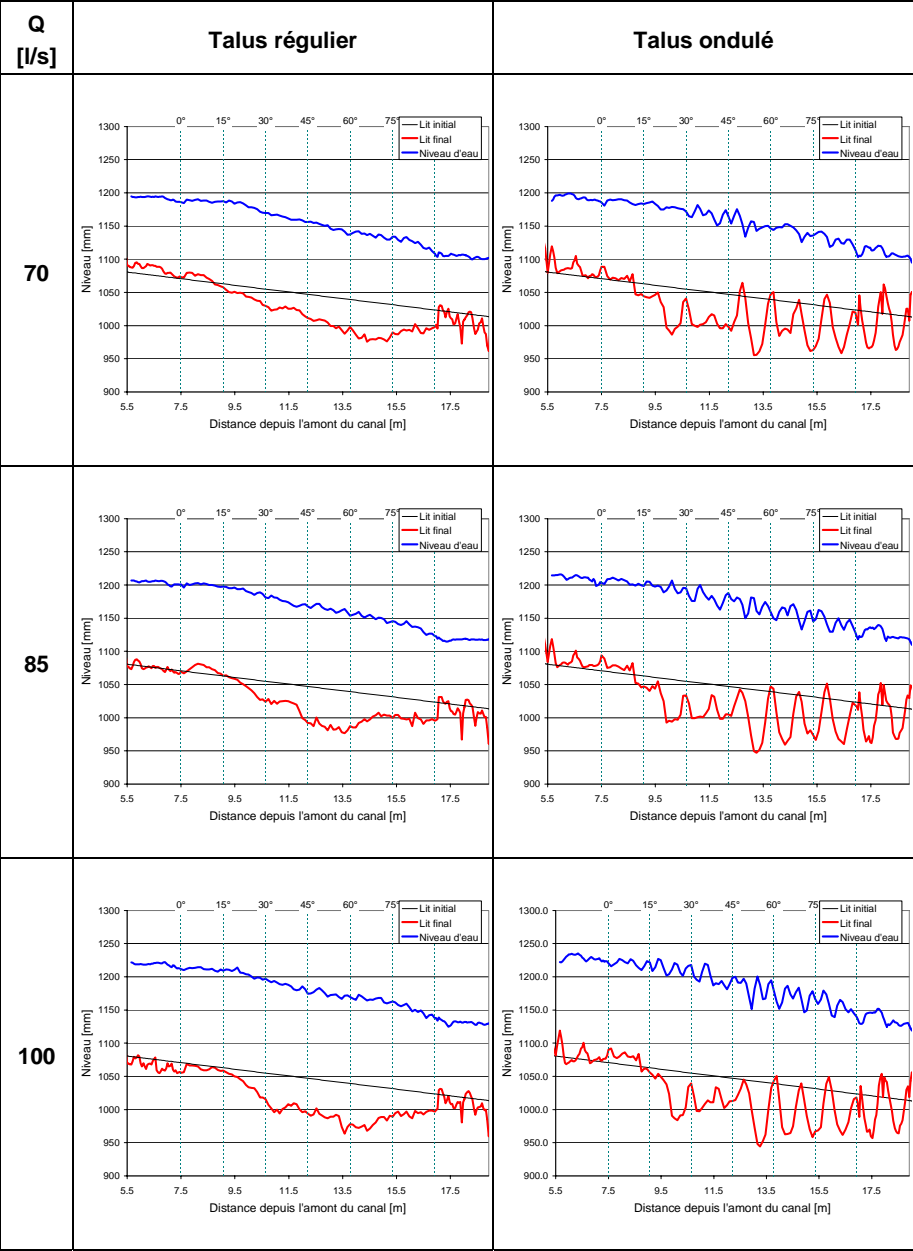


Tableau 97: Profils en long, R = 6100 mm (R = 6000 mm à l'axe)

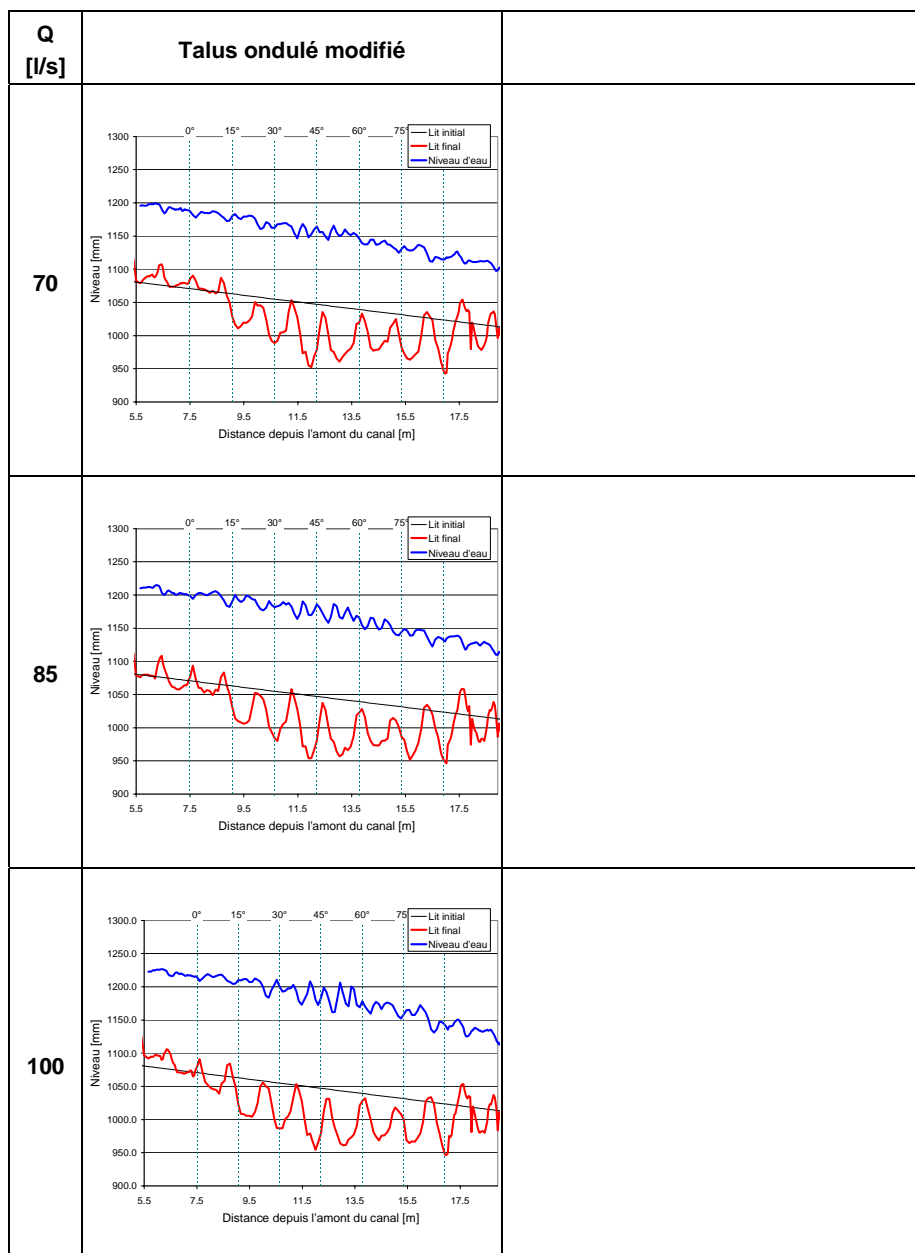


Tableau 98: Profils en long, R = 6100 mm (R = 6000 mm à l'axe)

Annexe A10.5: Profils en long, R variable

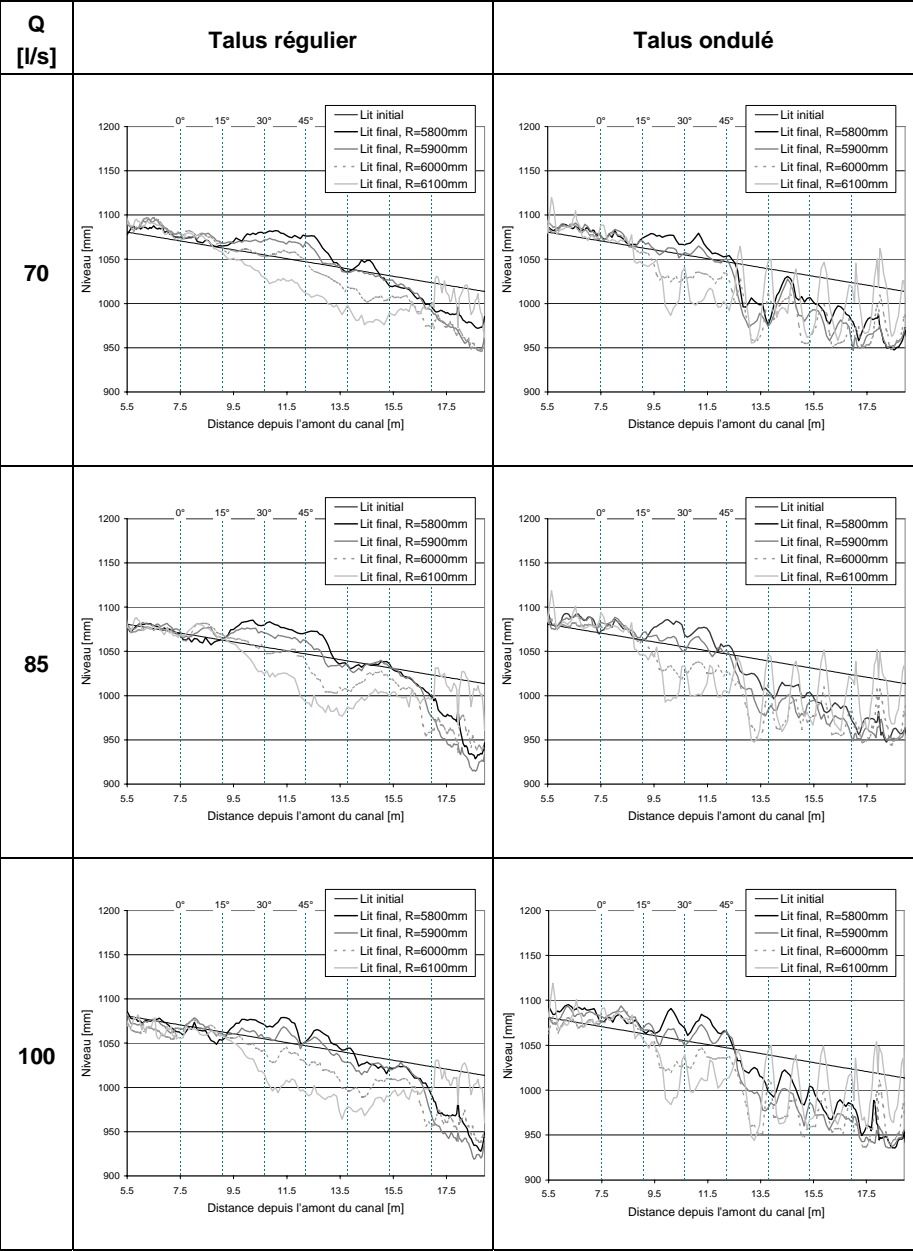


Tableau 99: Profils en long, R variable

Annexe A11: Profils en long et érosion, rayon R = 6100 mm

- Annexe A11.1: Comparaison des profils en long, R = 6100 mm
- Annexe A11.2: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (1)
- Annexe A11.3: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (2)
- Annexe A11.4: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (3)

**Annexe A11.1: Comparaison des profils en long, R = 6100 mm
(R = 6000 mm à l'axe)**

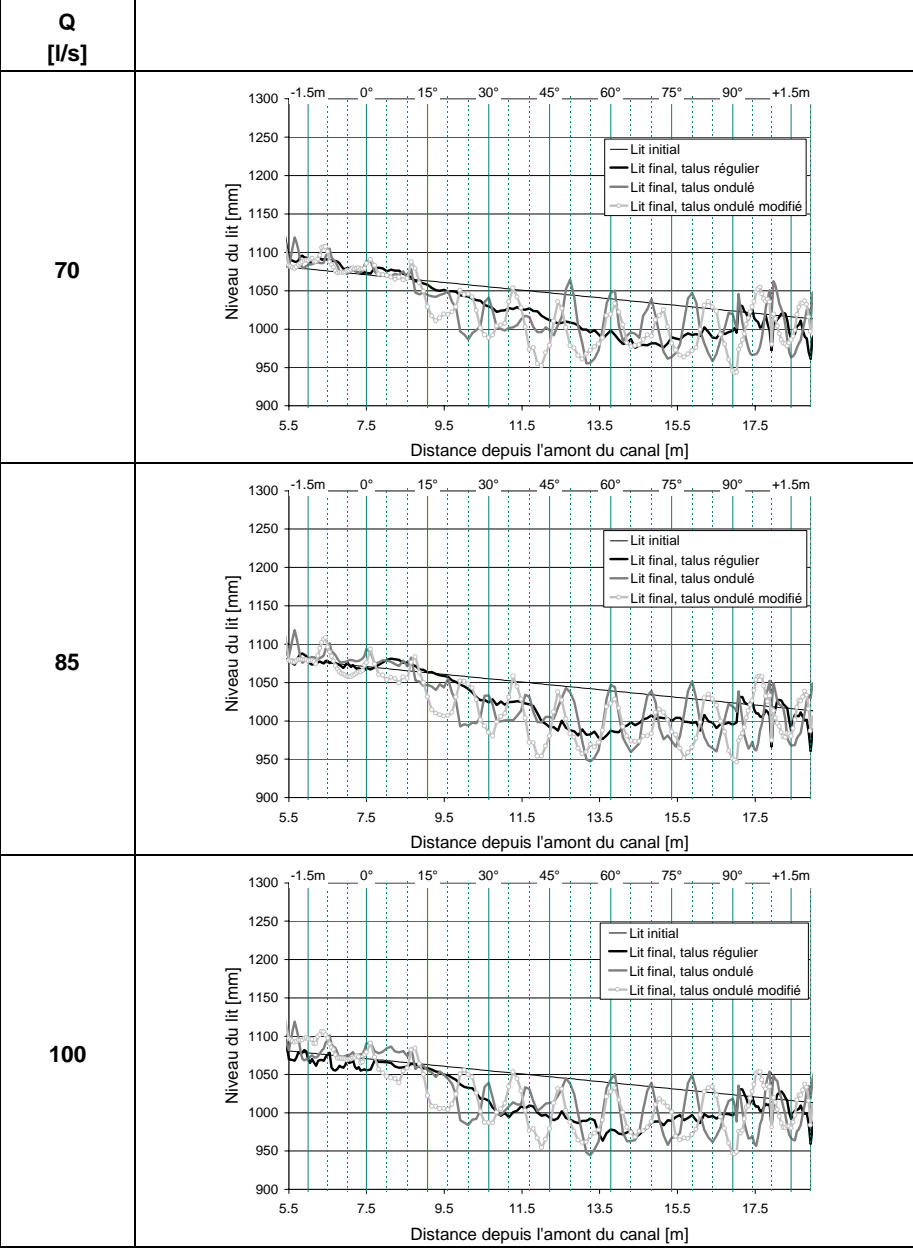


Tableau 100: Comparaison des profils en long, R = 6100 mm

Annexe A11.2: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (1)
(R = 6000 mm à l'axe)

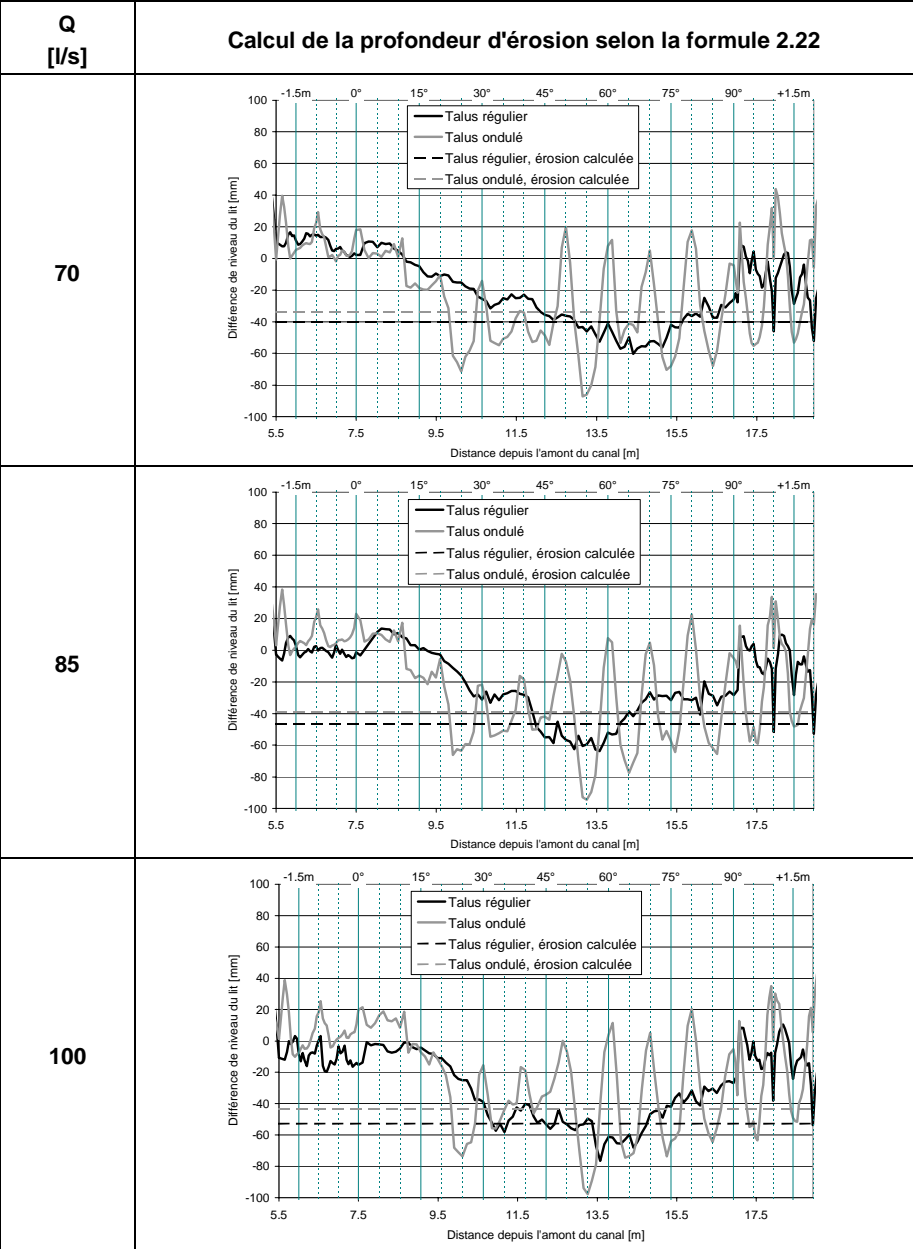


Tableau 101: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (1)

Annexe A11.3: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (2)
(R = 6000 mm à l'axe)

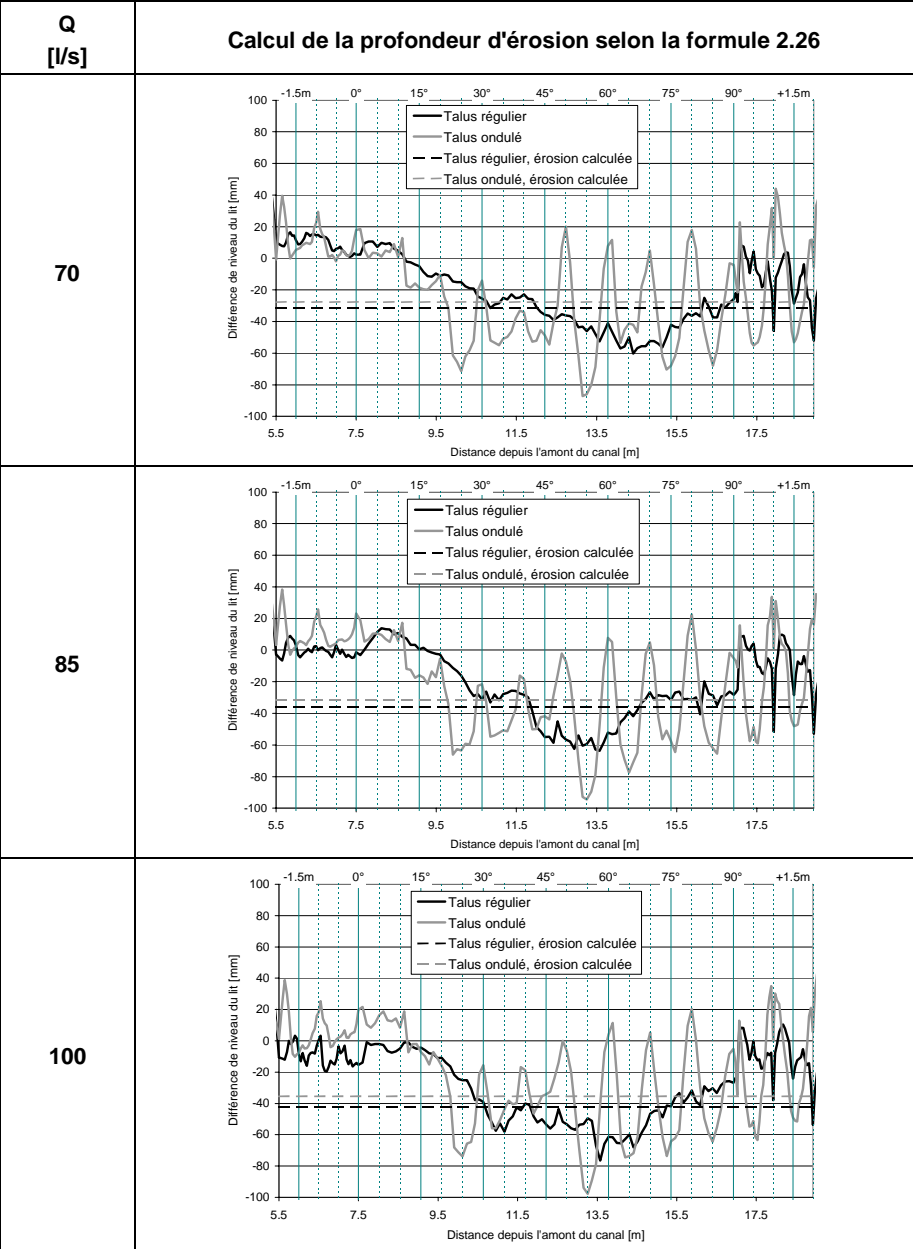


Tableau 102: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (2)

Annexe A11.4: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (3)
(R = 6000 mm à l'axe)

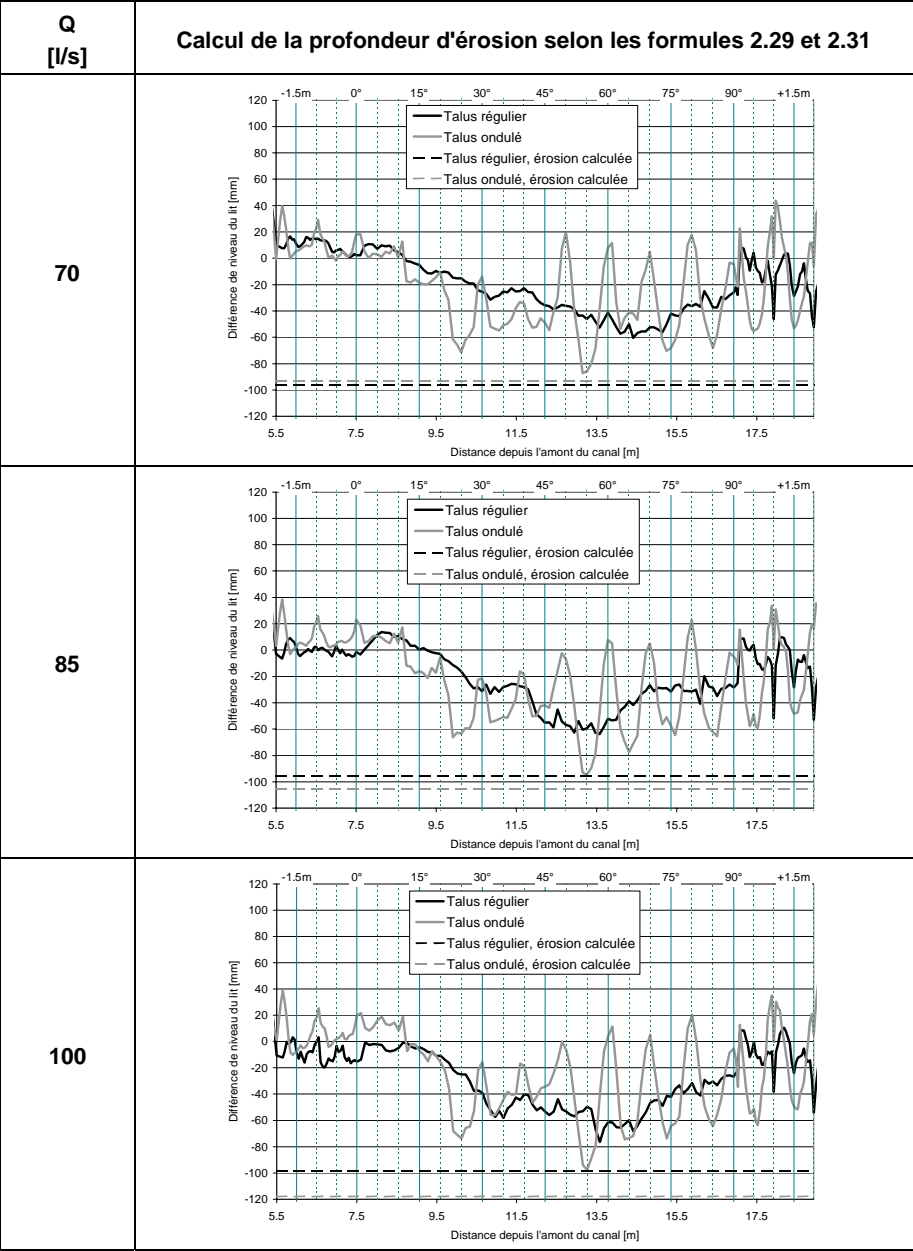


Tableau 103: Comparaison des profondeurs d'érosion, R = 6100 mm (3)

Annexe A12: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa et al. (1976)

Annexe A12.1: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa et al. (1976), $Q = 70 \text{ l/s}$

Annexe A12.2: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa et al. (1976), $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A12.3: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa et al. (1976), $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A12.1: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

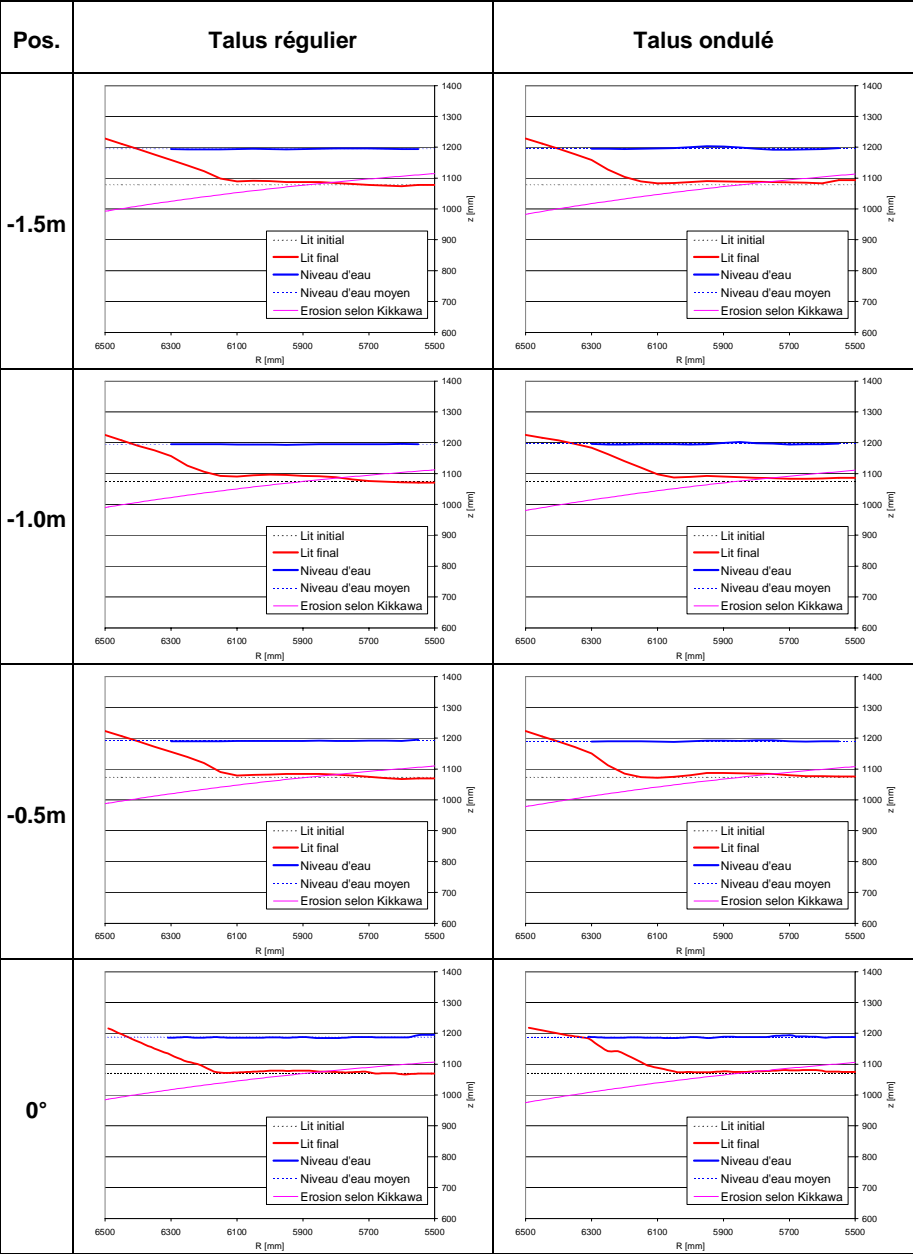


Tableau 104: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

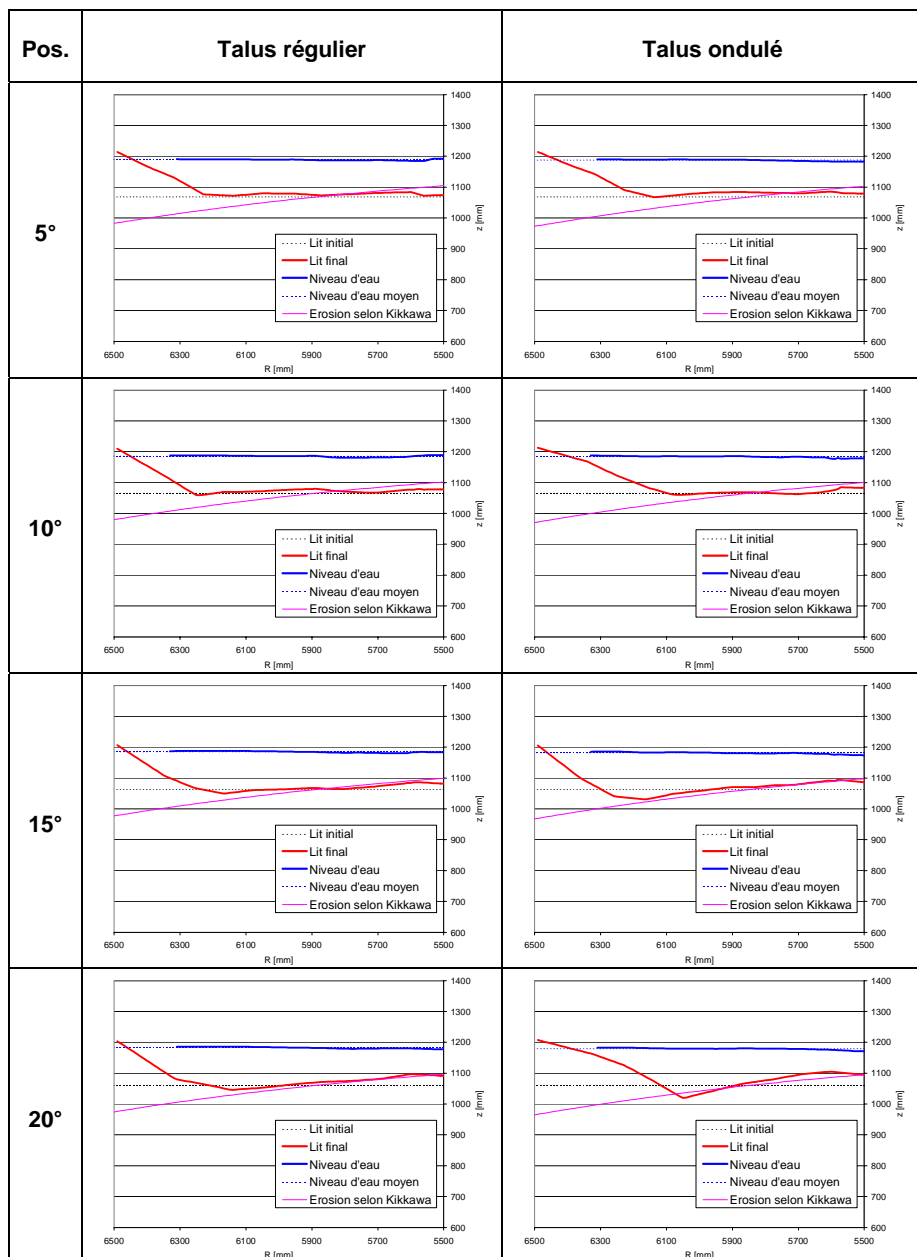


Tableau 105: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

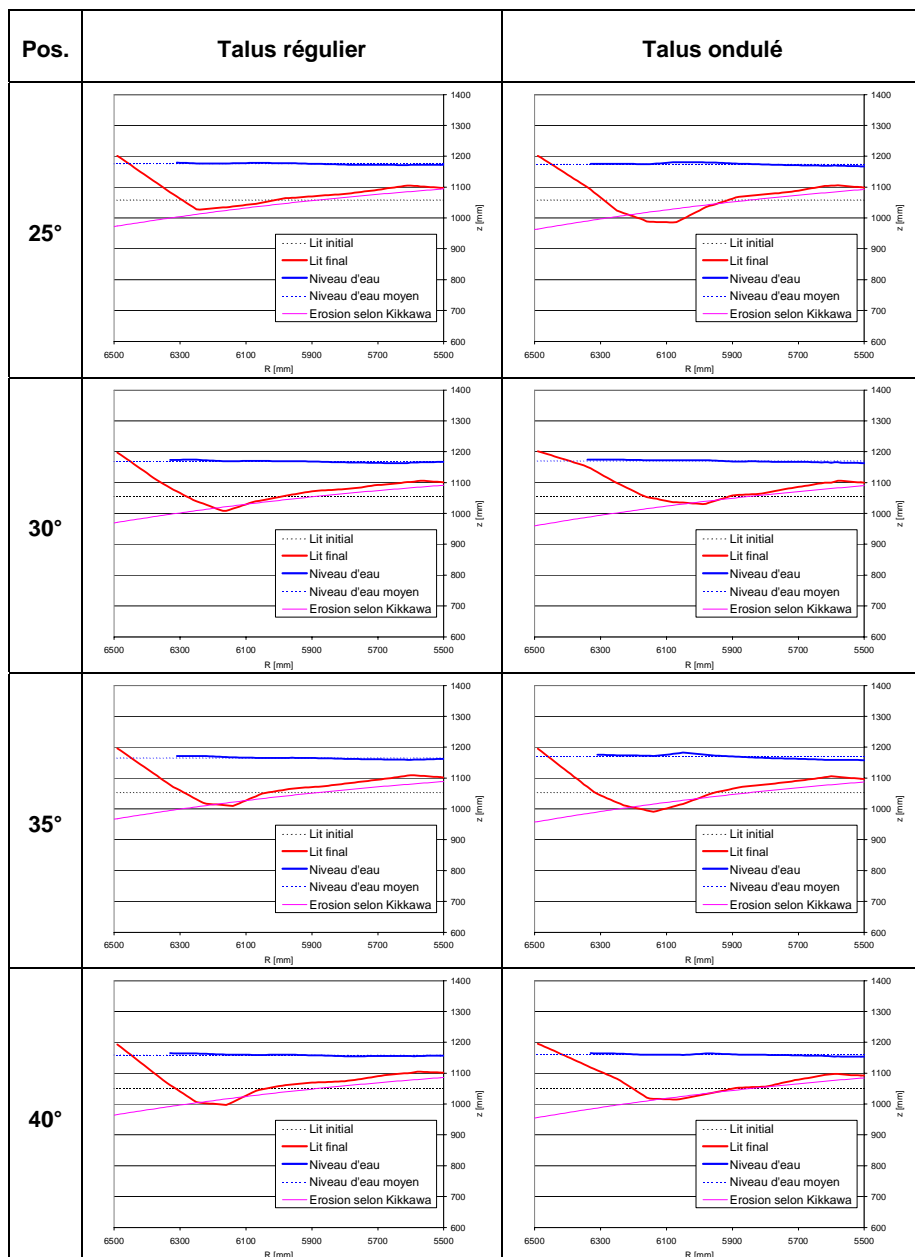


Tableau 106: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

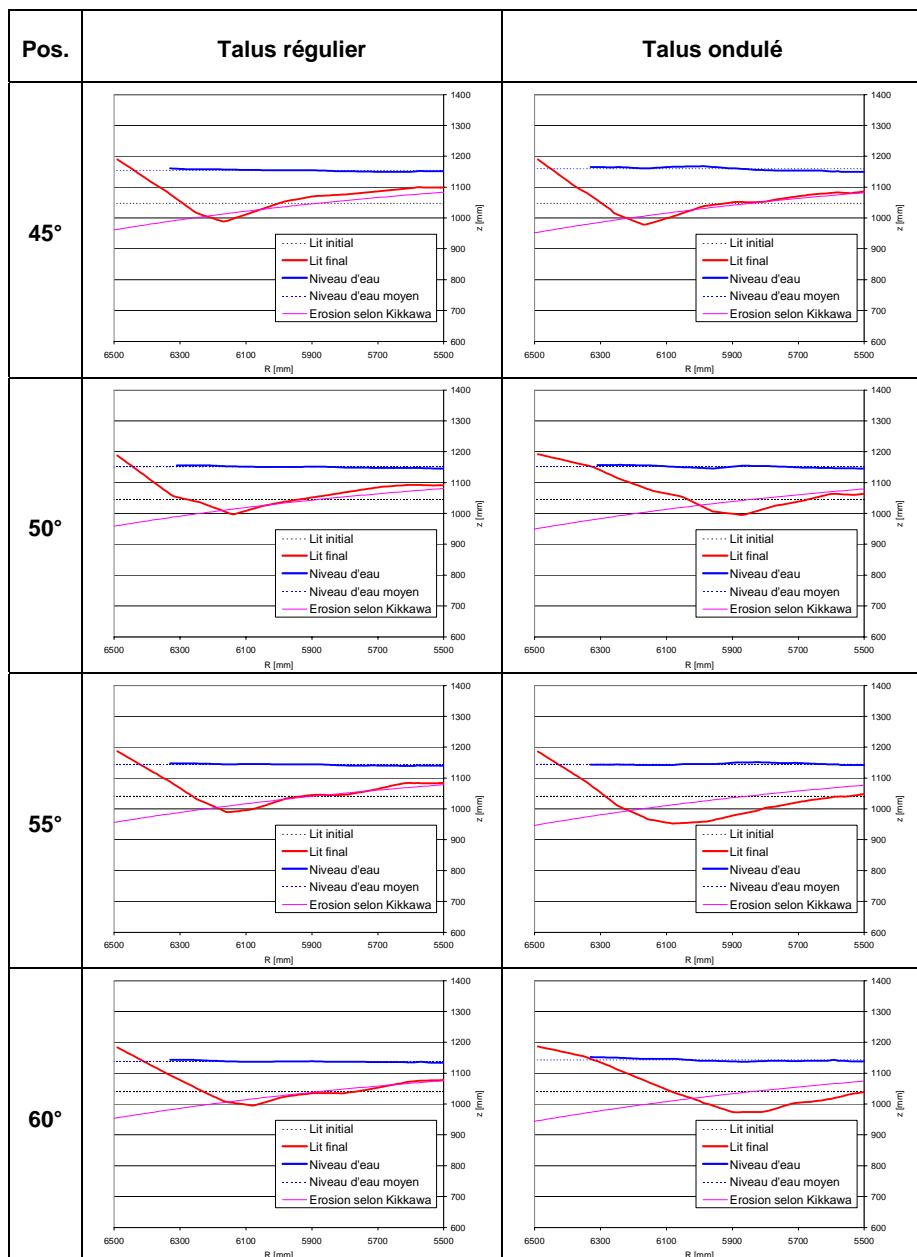


Tableau 107: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

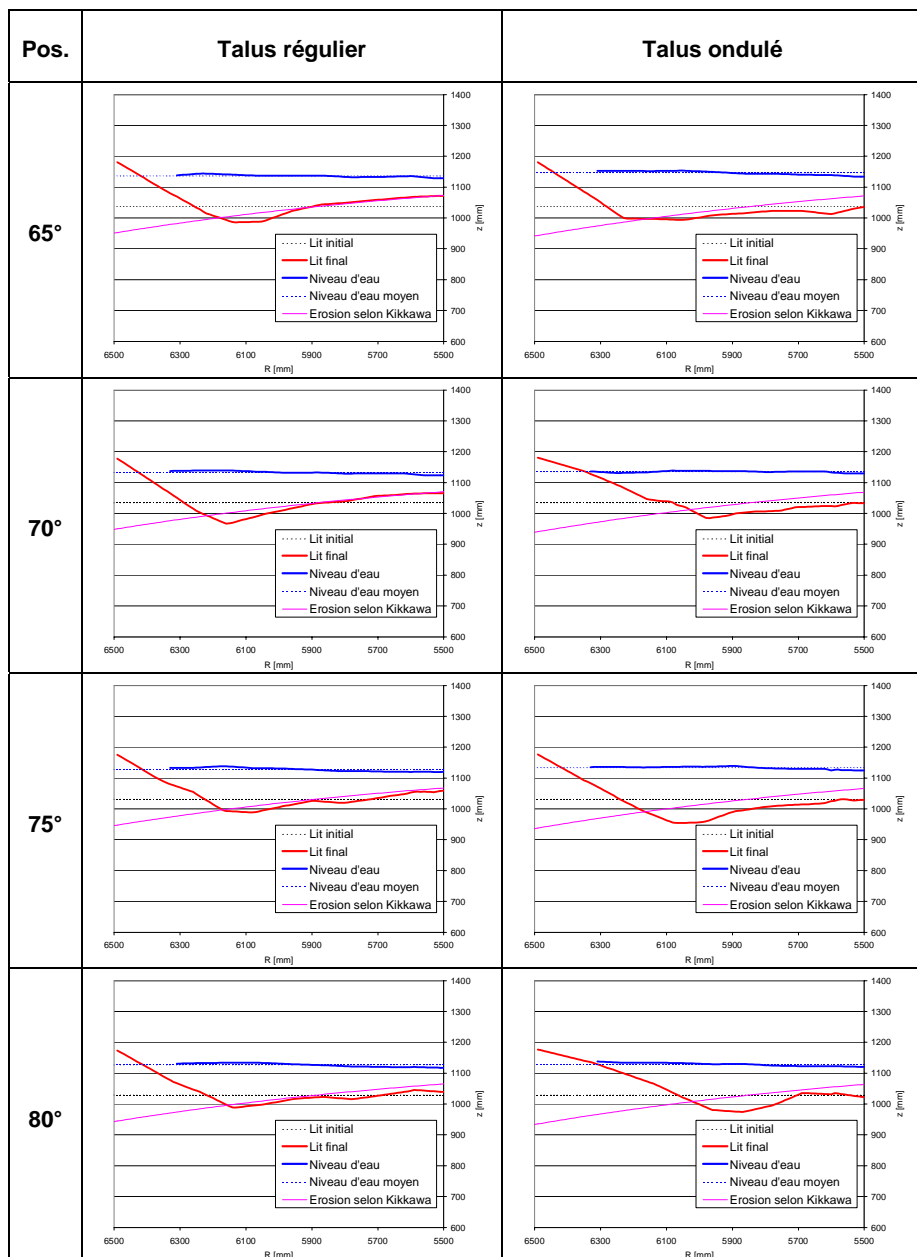


Tableau 108: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

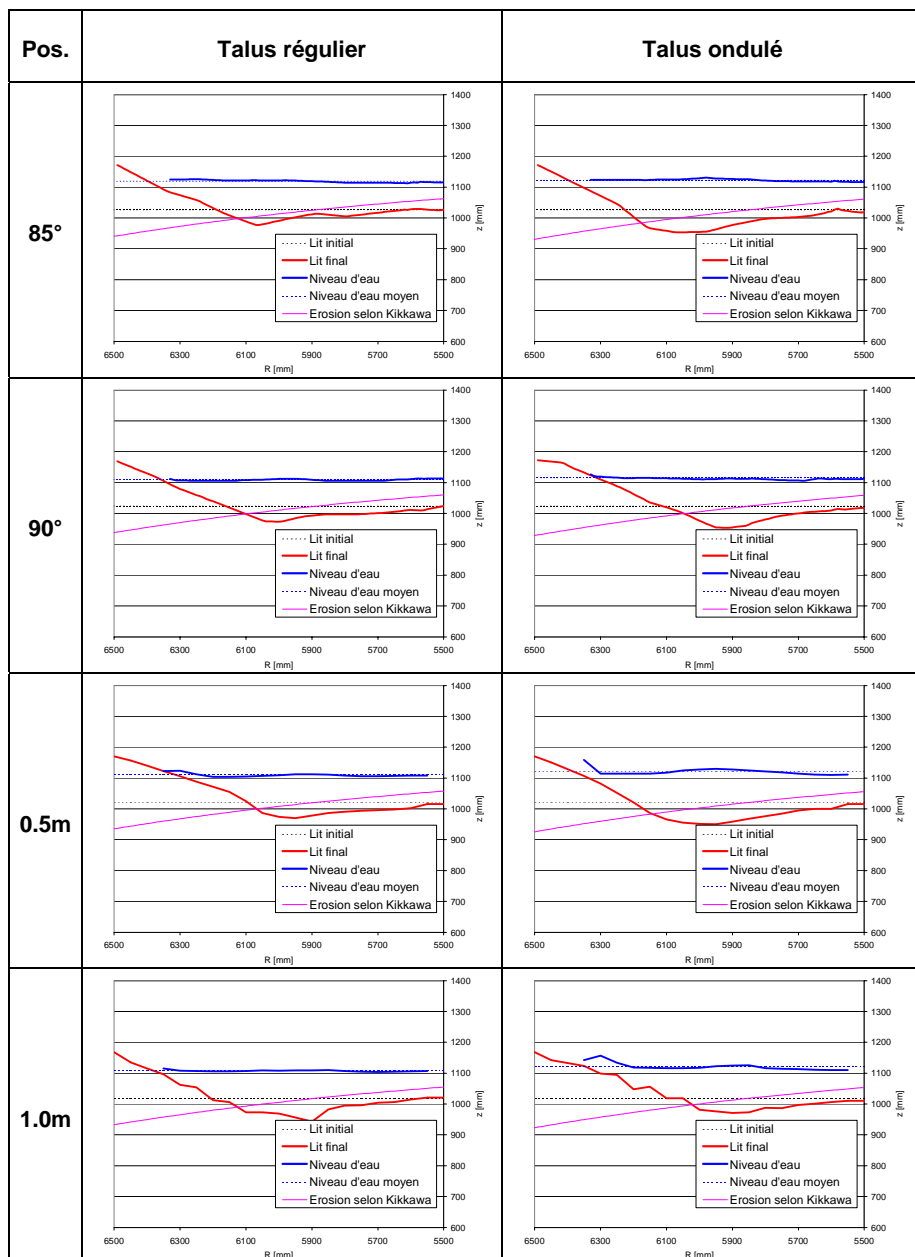


Tableau 109: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

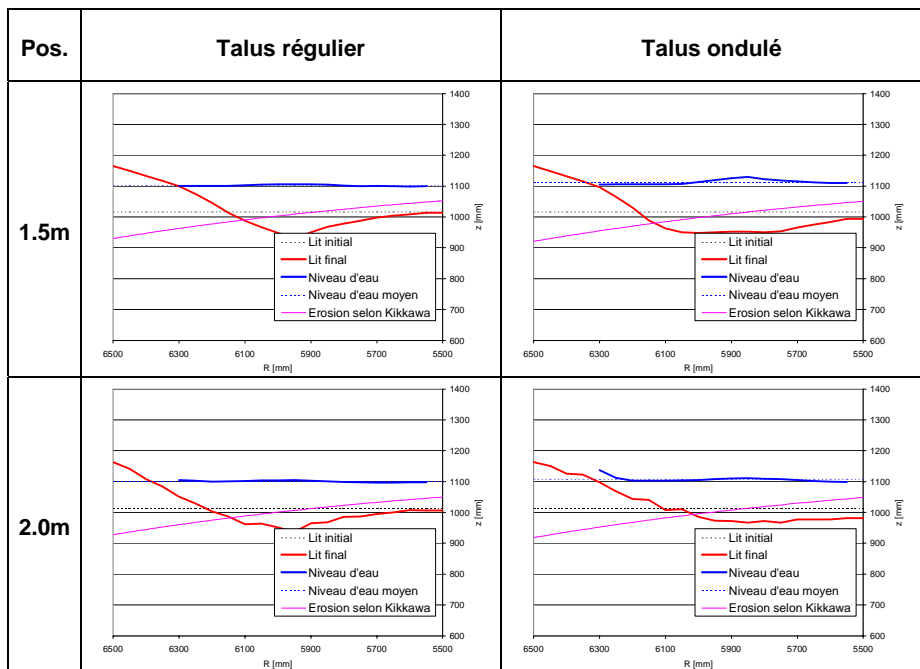


Tableau 110: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 70 \text{ l/s}$

Annexe A12.2: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, Q = 85 l/s

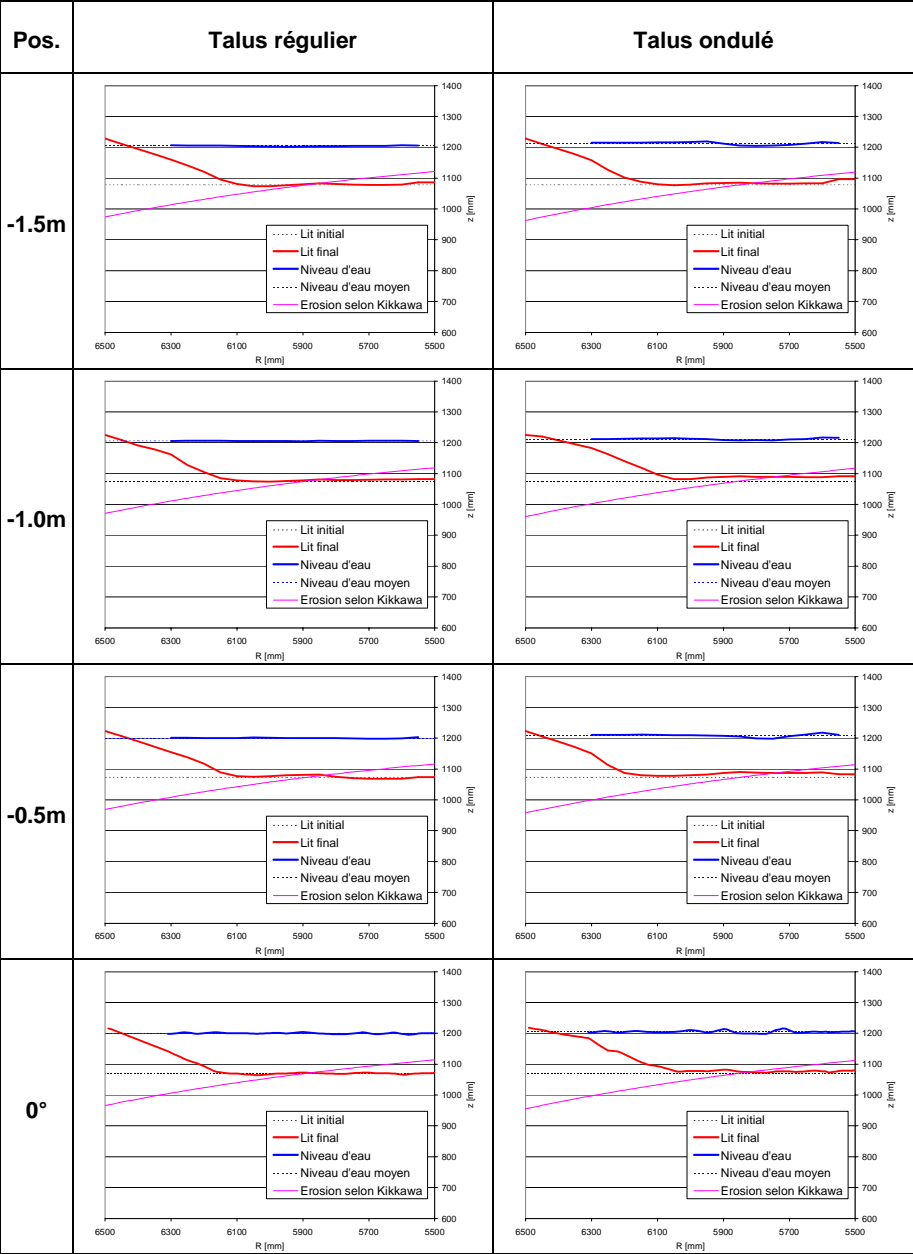


Tableau 111: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, Q = 85 l/s

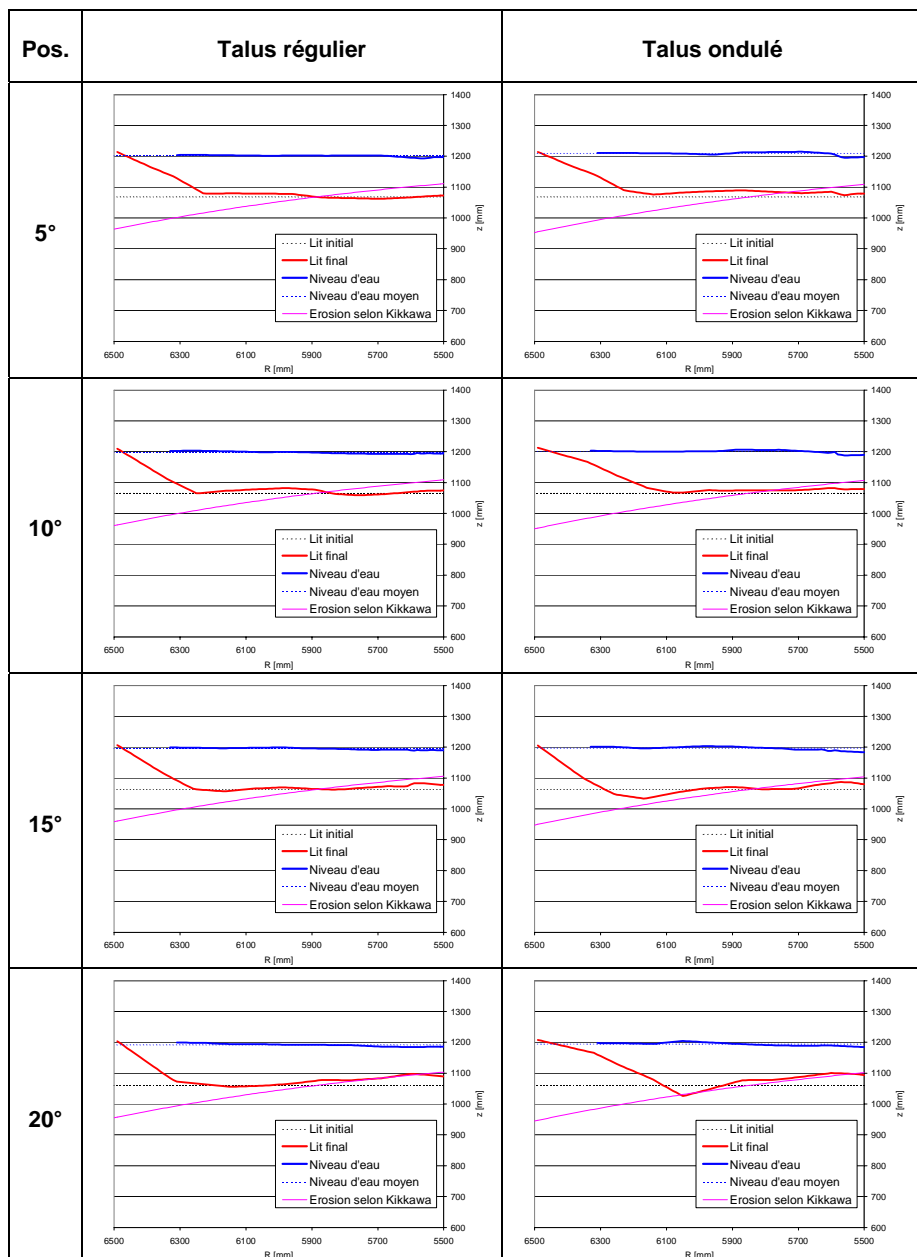


Tableau 112: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

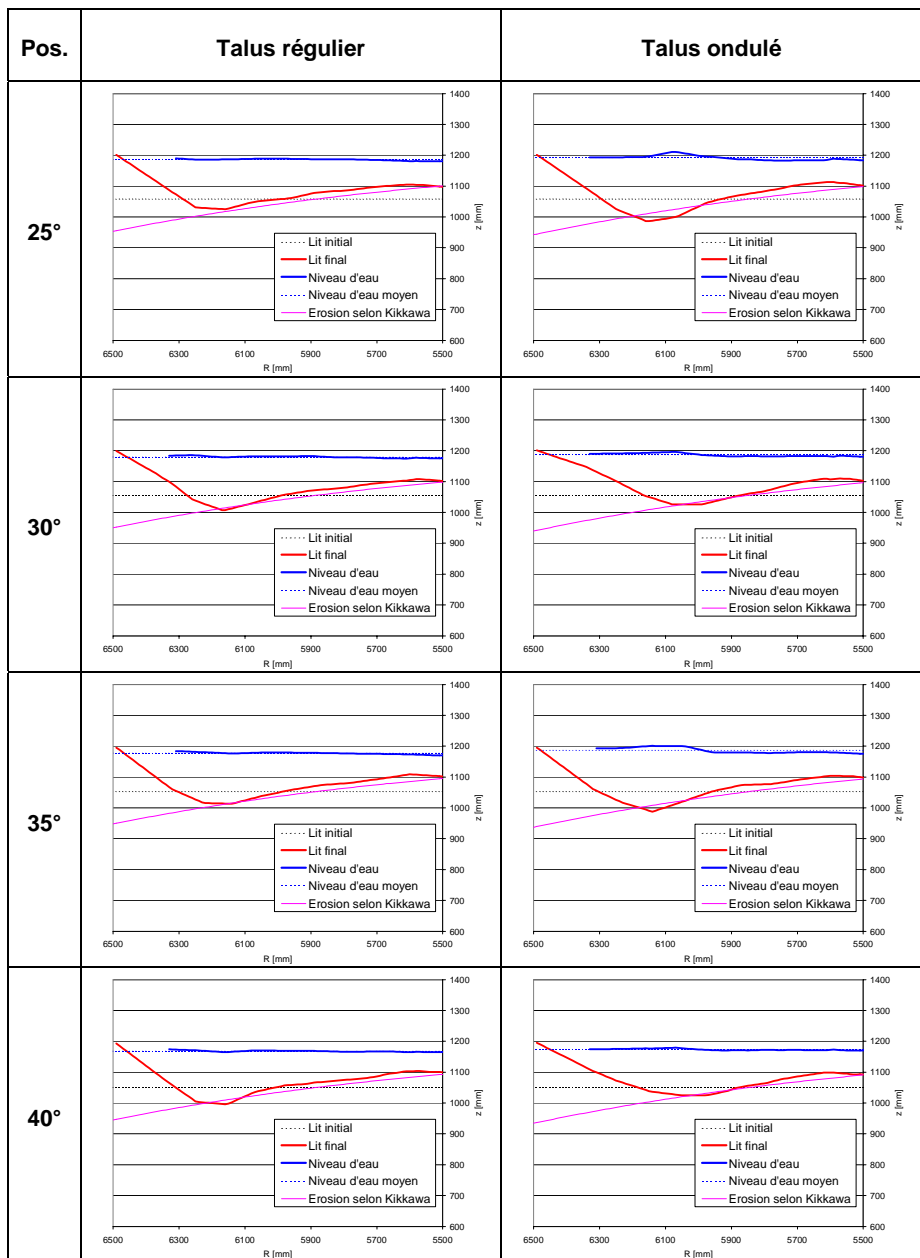


Tableau 113: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

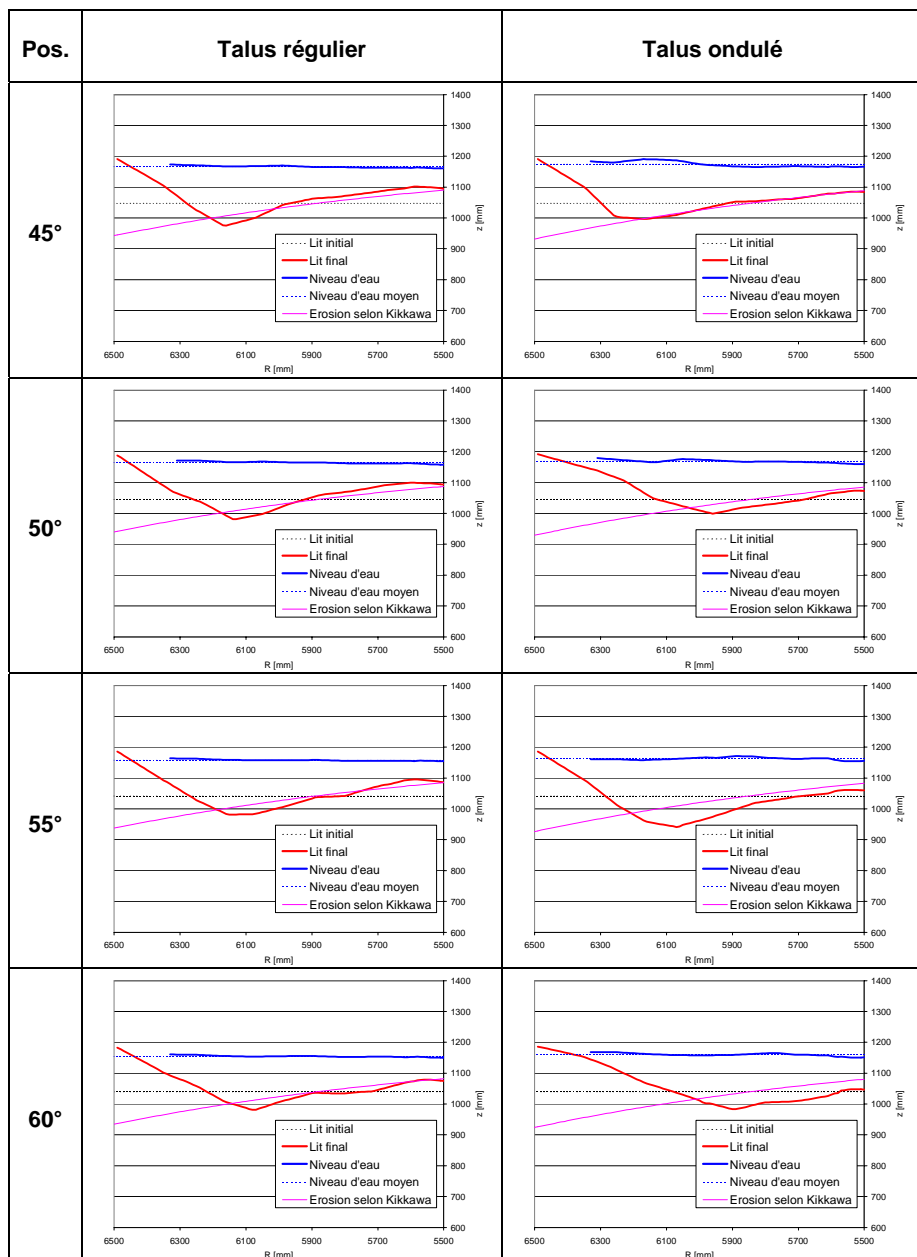


Tableau 114: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

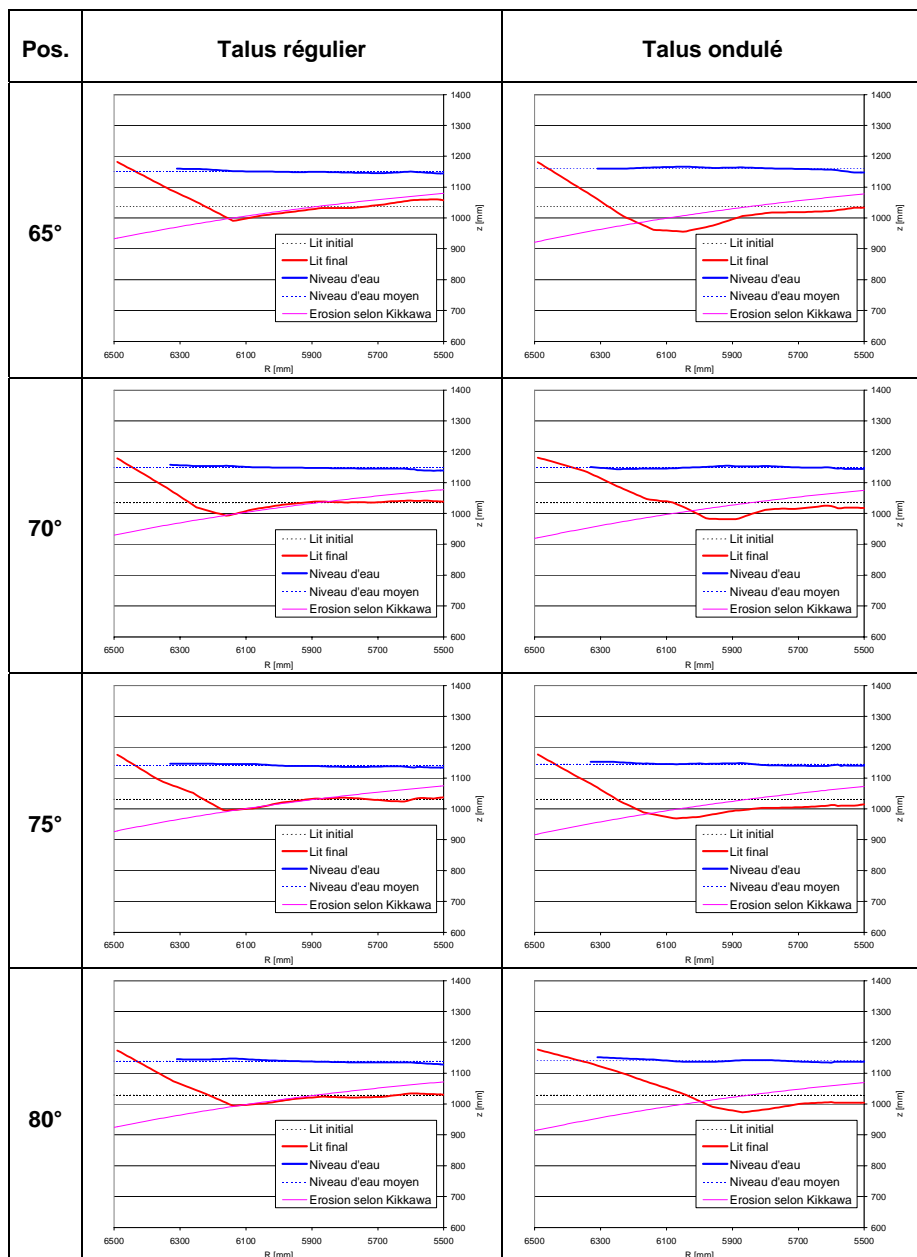


Tableau 115: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

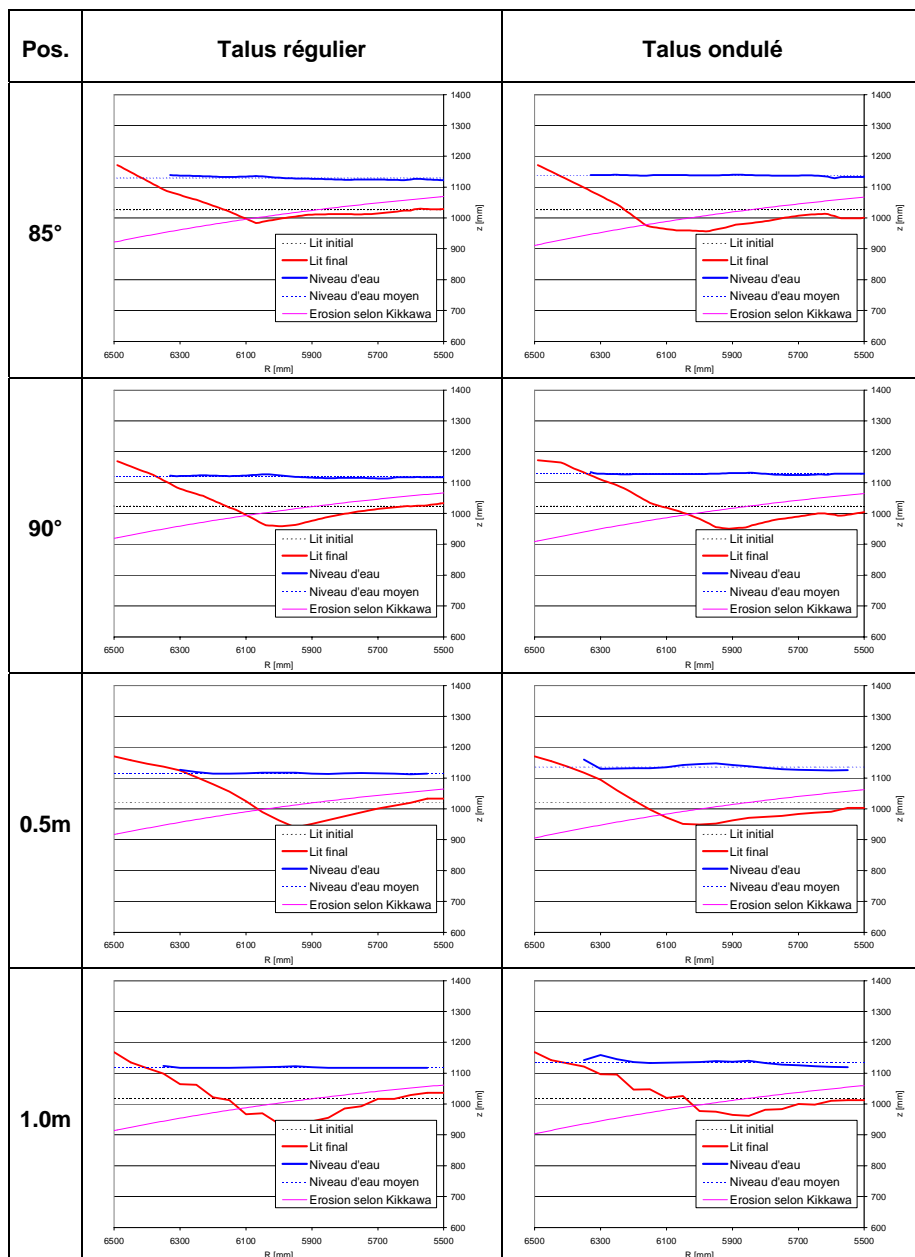


Tableau 116: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

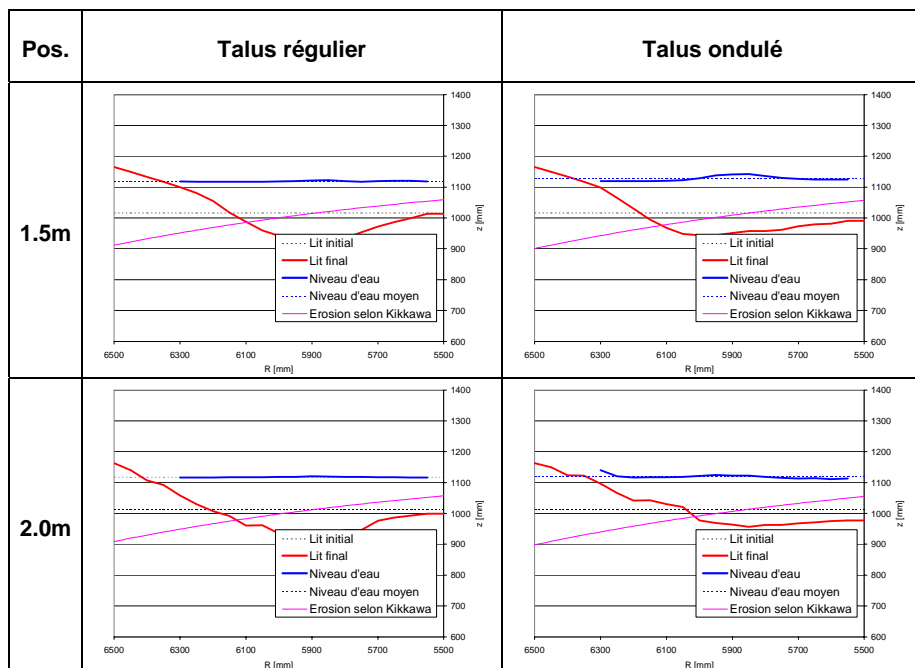


Tableau 117: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 85 \text{ l/s}$

Annexe A12.3: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, Q = 100 l/s

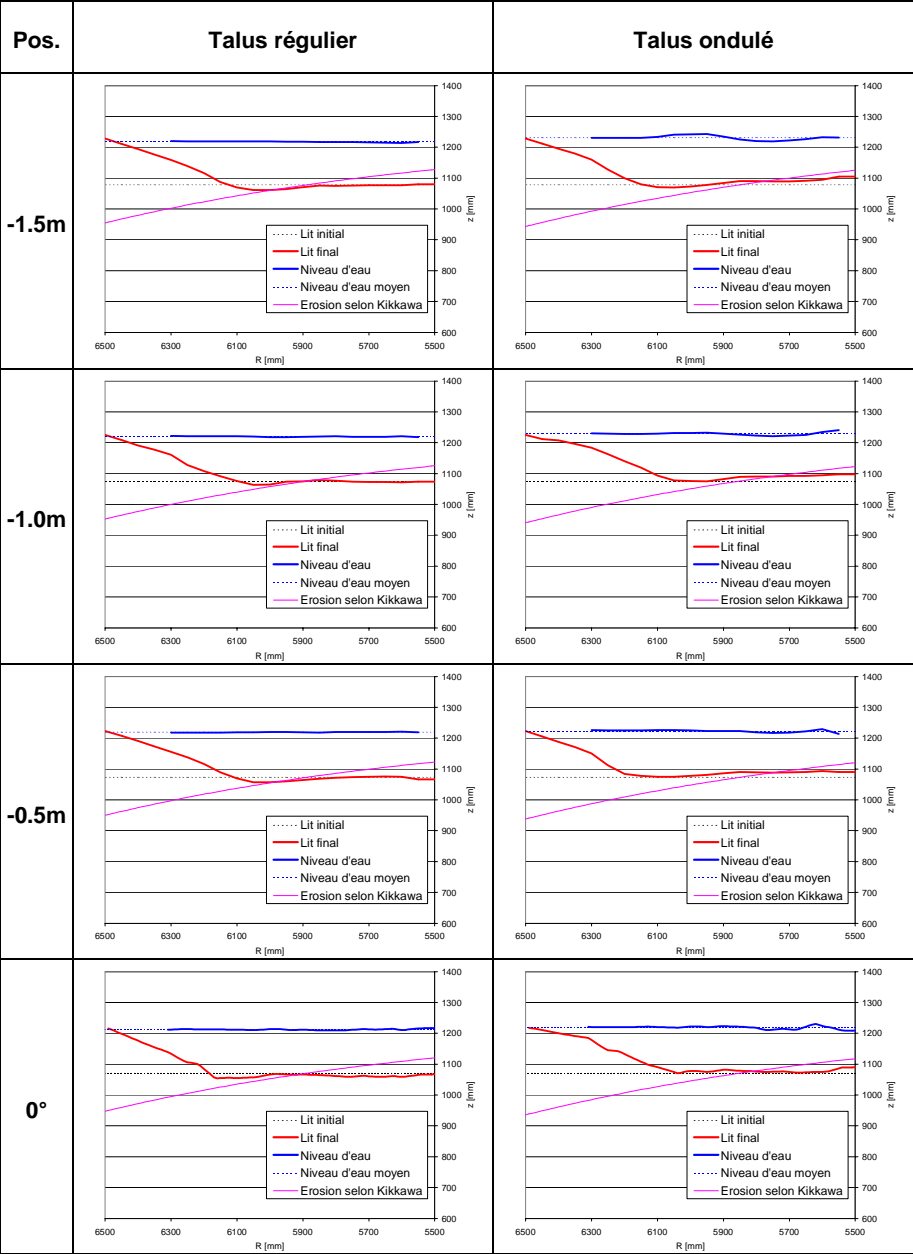


Tableau 118: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, Q = 100 l/s

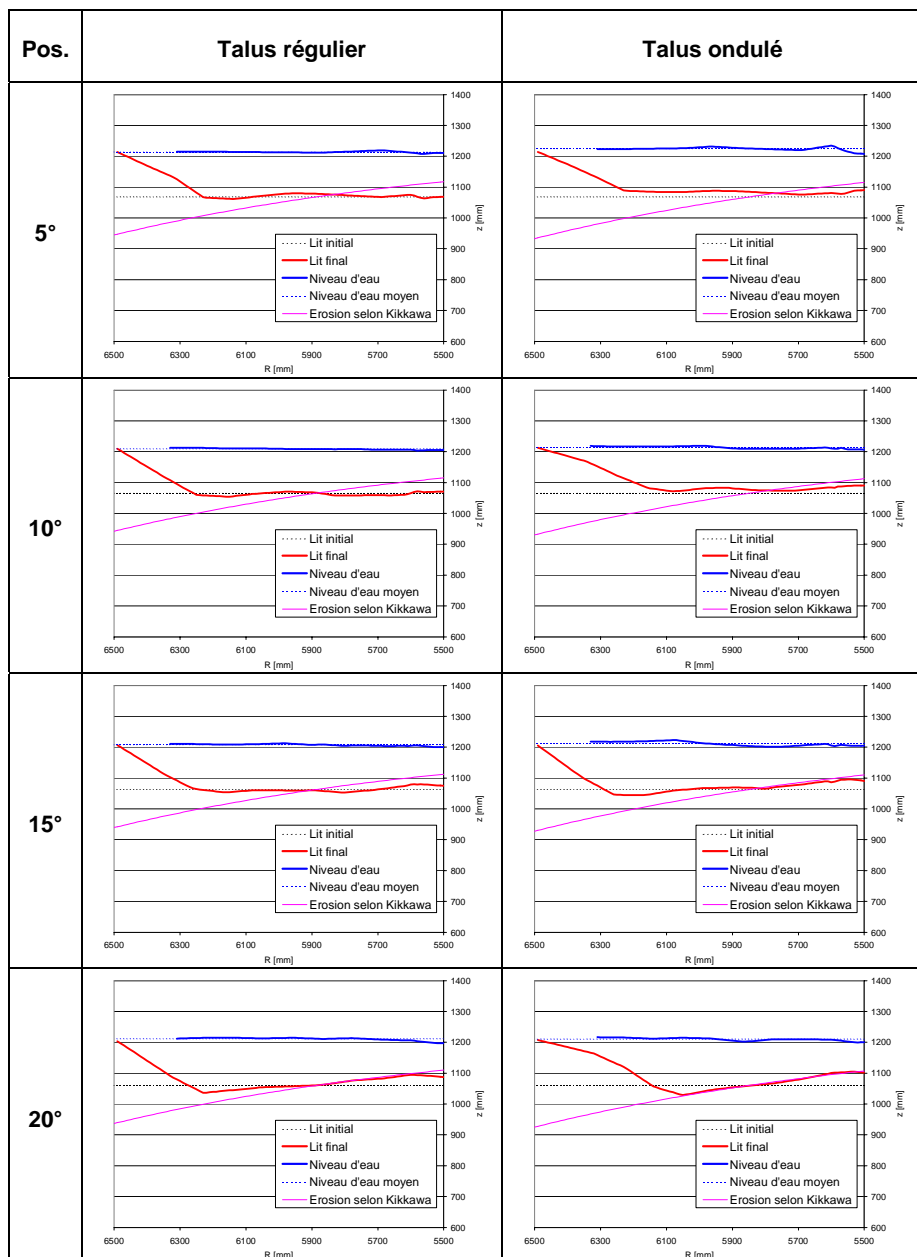


Tableau 119: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100 \text{ l/s}$

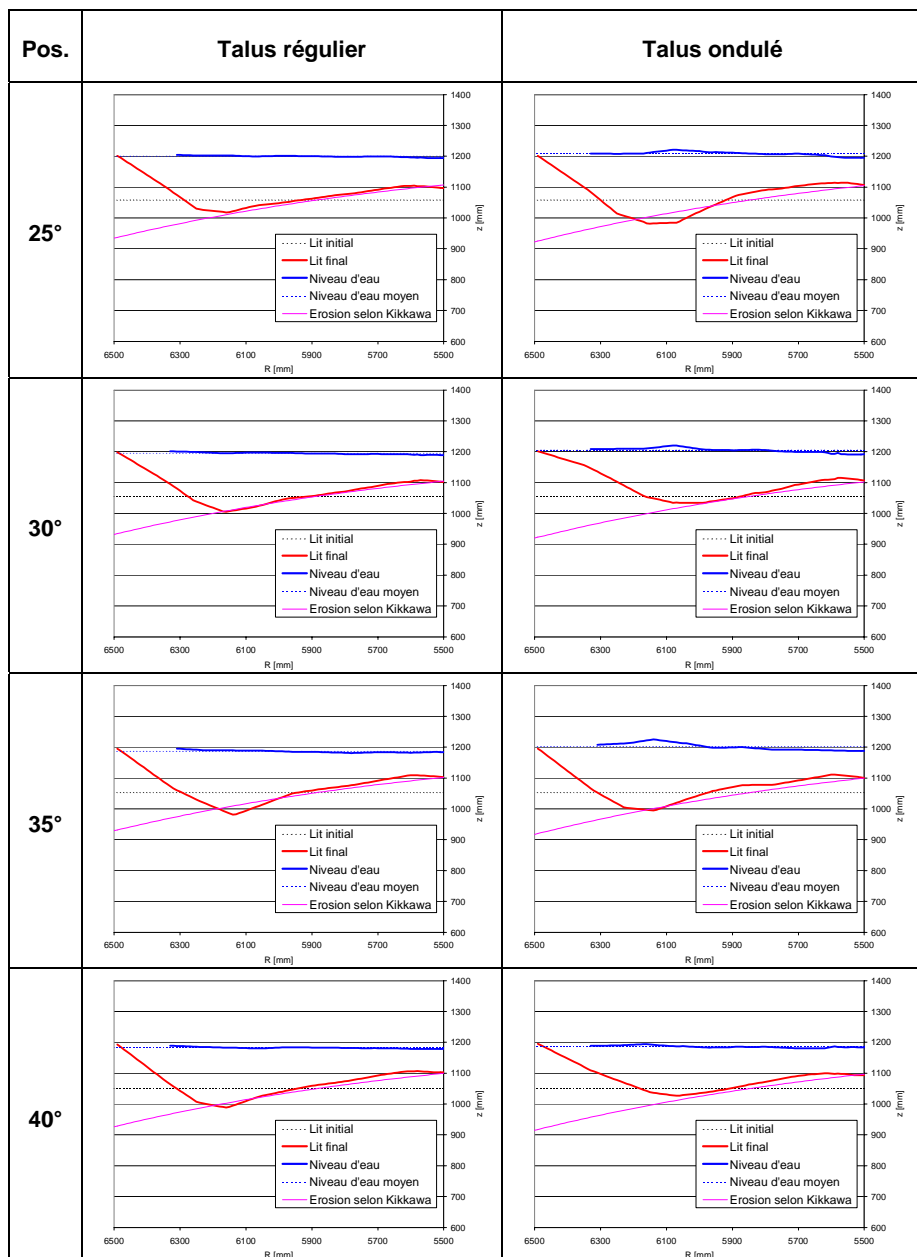


Tableau 120: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100 \text{ l/s}$

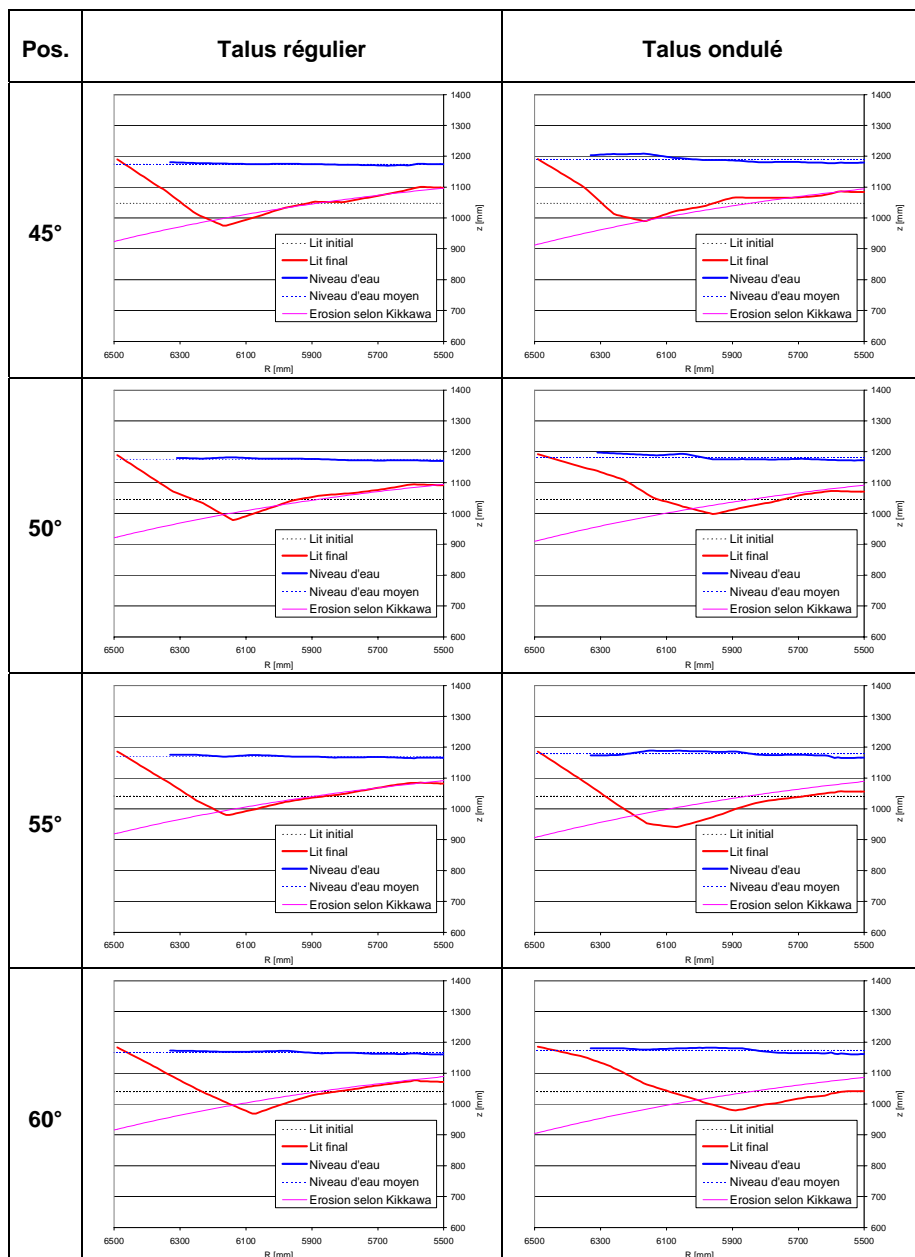


Tableau 121: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100 \text{ l/s}$

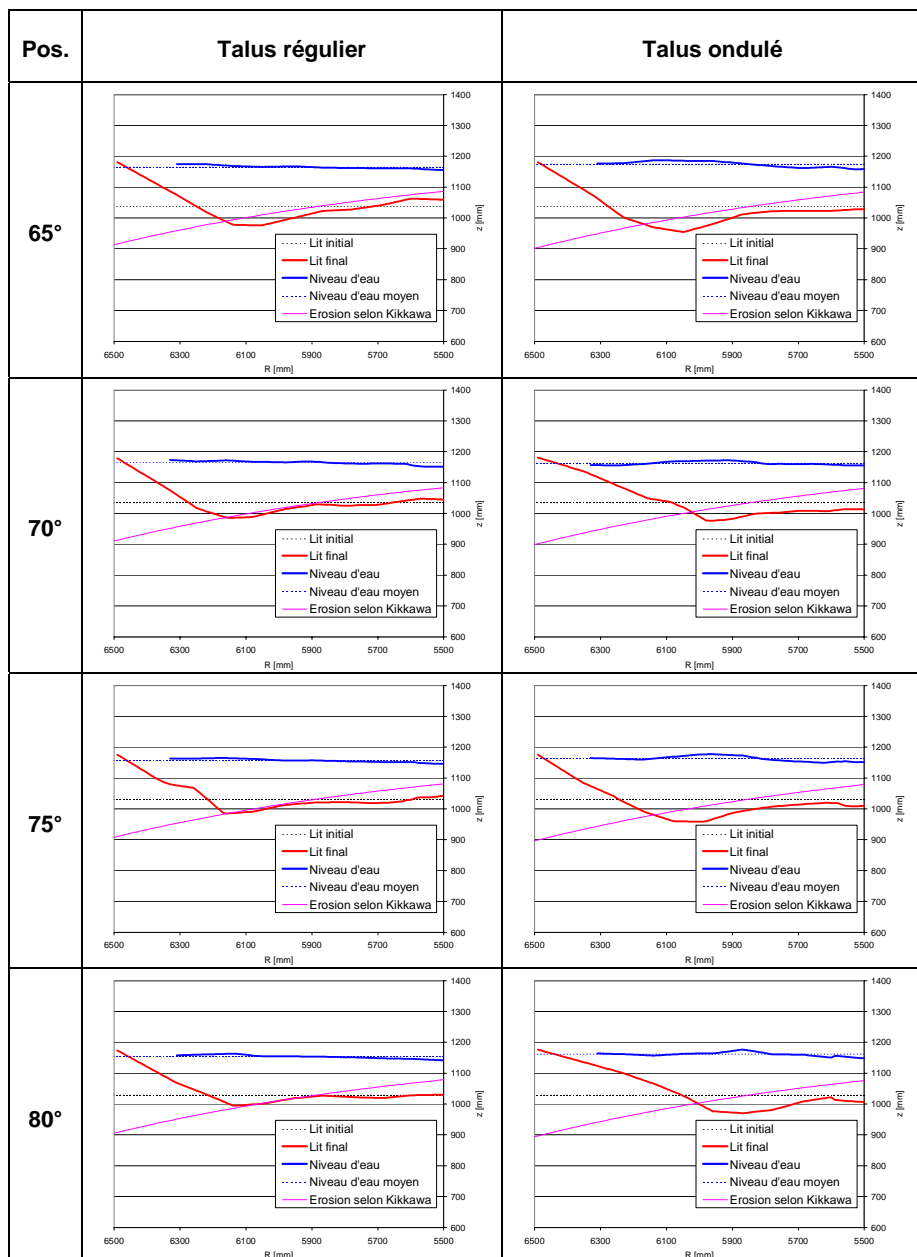


Tableau 122: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100 \text{ l/s}$

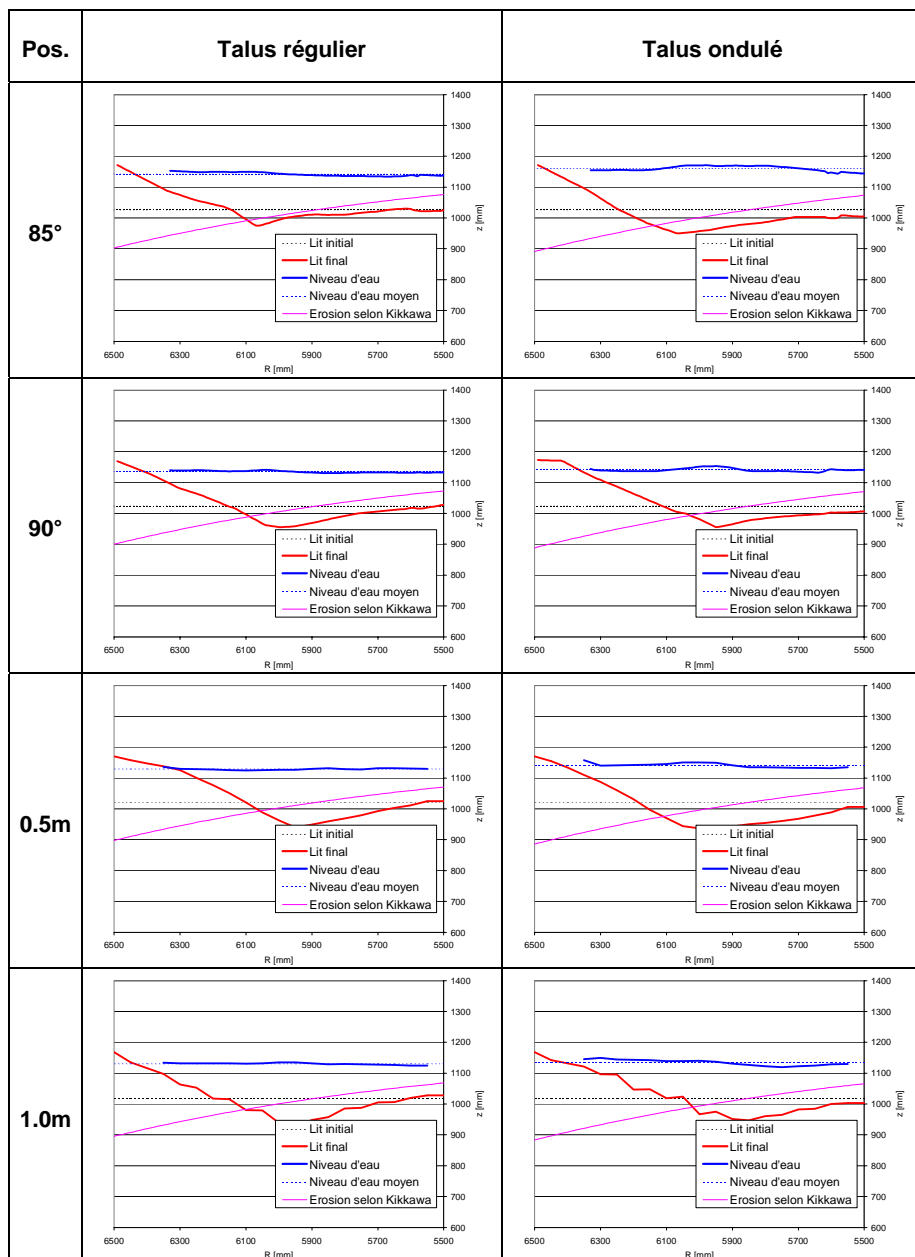


Tableau 123: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100$ l/s

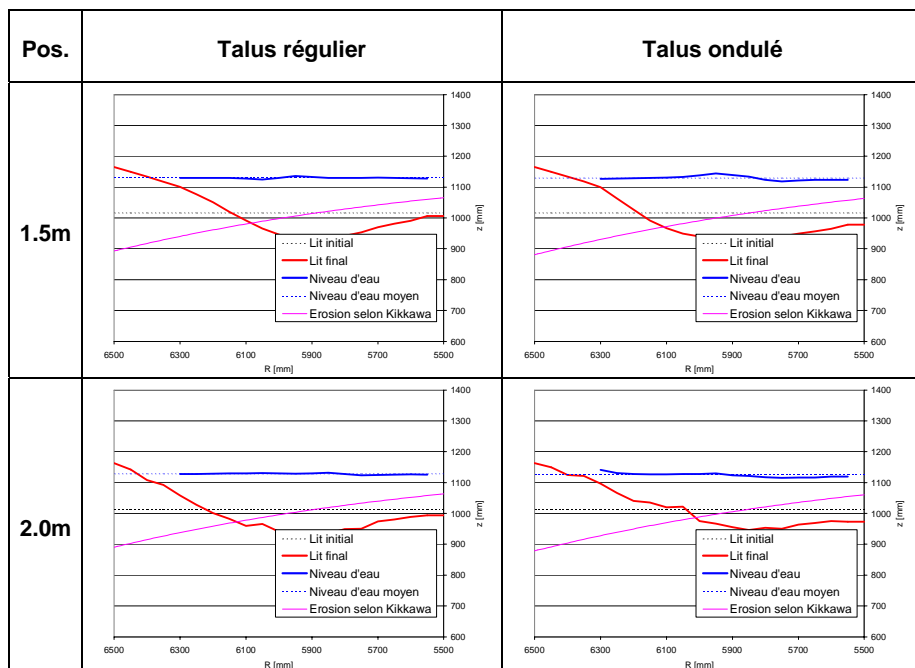


Tableau 124: Profils en travers, avec érosion selon Kikkawa, $Q = 100 \text{ l/s}$

Annexe A13: Comparaison entre érosion calculée et mesurée

- Annexe A13.1: Comparaison des profondeurs d'affouillement ($h_s - h_m$)
- Annexe A13.2: Comparaison, en valeur absolue, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée
- Annexe A13.3: Comparaison, en valeur relative, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée

Annexe A13.1: Comparaison des profondeurs d'affouillement (h_s - h_m)

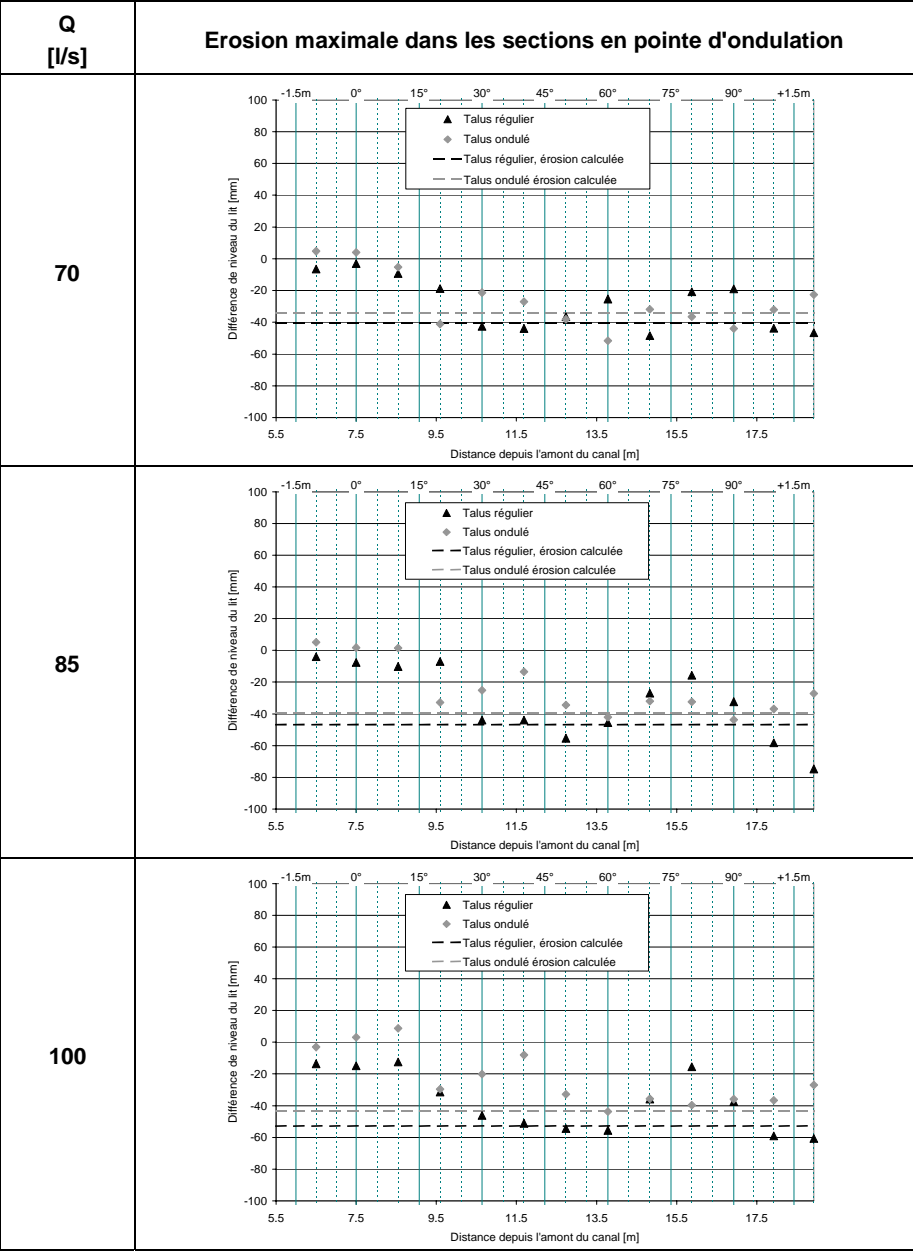


Tableau 125: Comparaison des profondeurs d'affouillement (h_s - h_m)

Annexe A13.2: Comparaison, en valeur absolue, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée

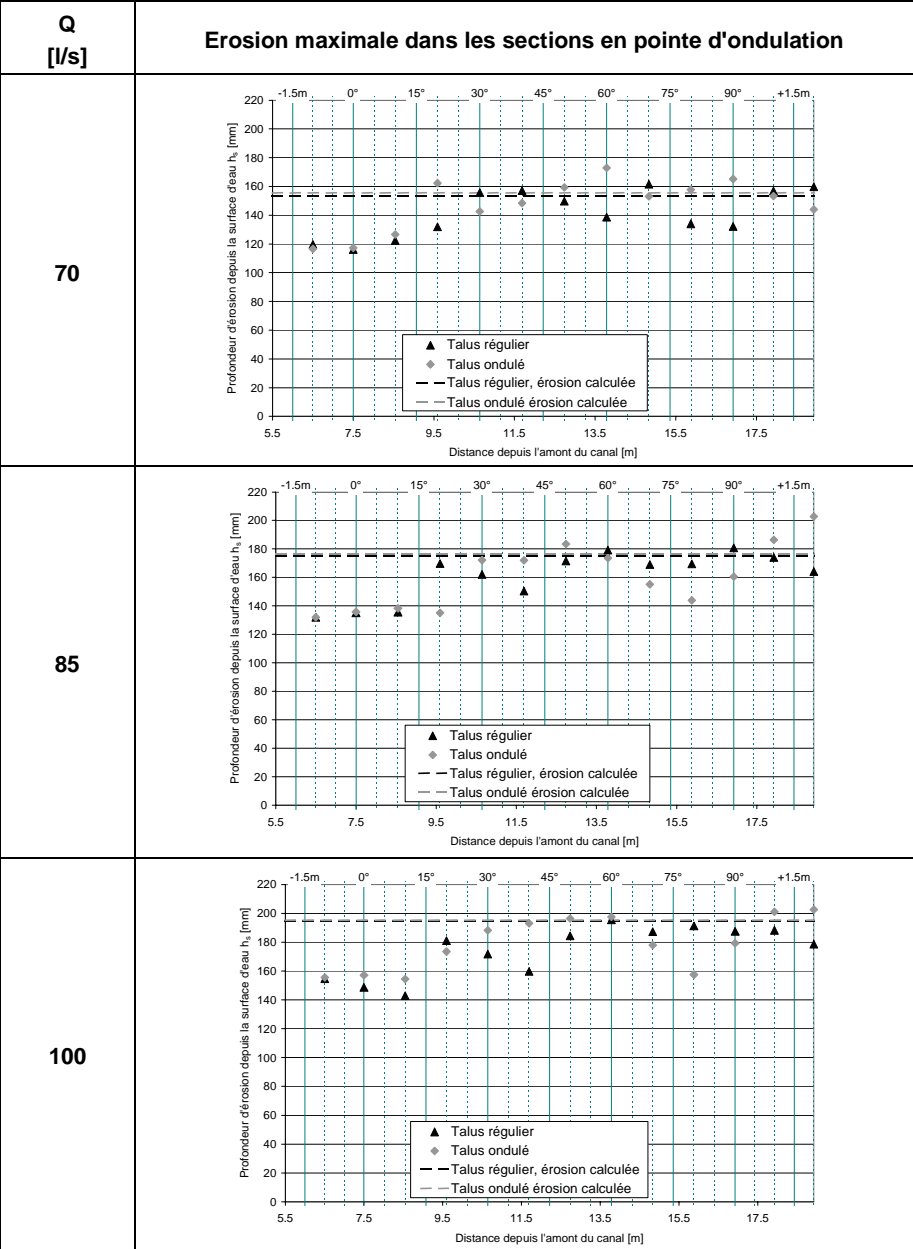


Tableau 126: Comparaison, en valeur absolue, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée

Annexe A13.3: Comparaison, en valeur relative, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée

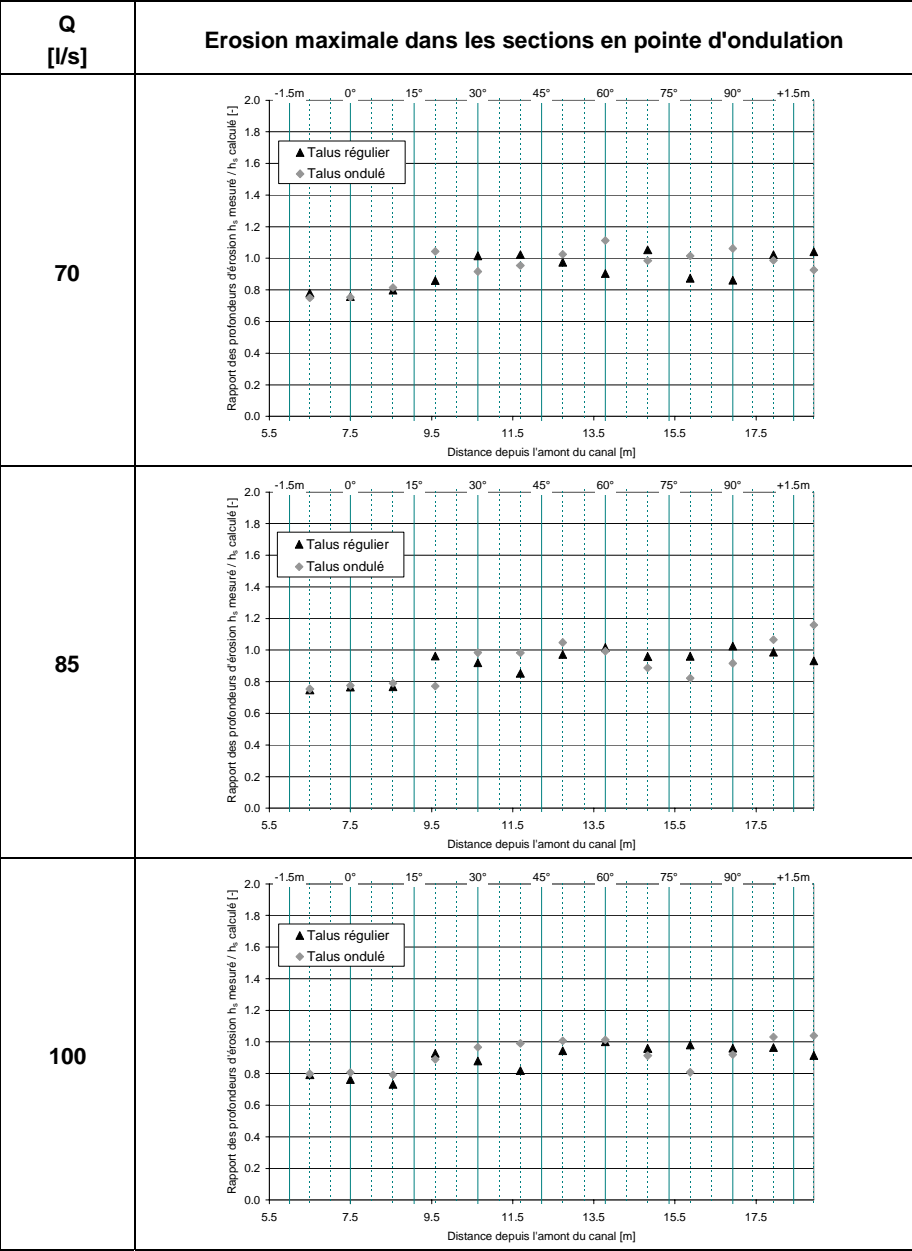


Tableau 127: Comparaison, en valeur relative, entre profondeurs d'érosion (h_s) mesurée et calculée

Annexe A14: Bilan volumique dans la zone principale d'érosion

Annexe A14.1: Mesure de la topographie du fond

Annexe A14.2: Différences de niveau du fond par rapport au lit initial

Annexe A14.1: Mesure de la topographie du fond

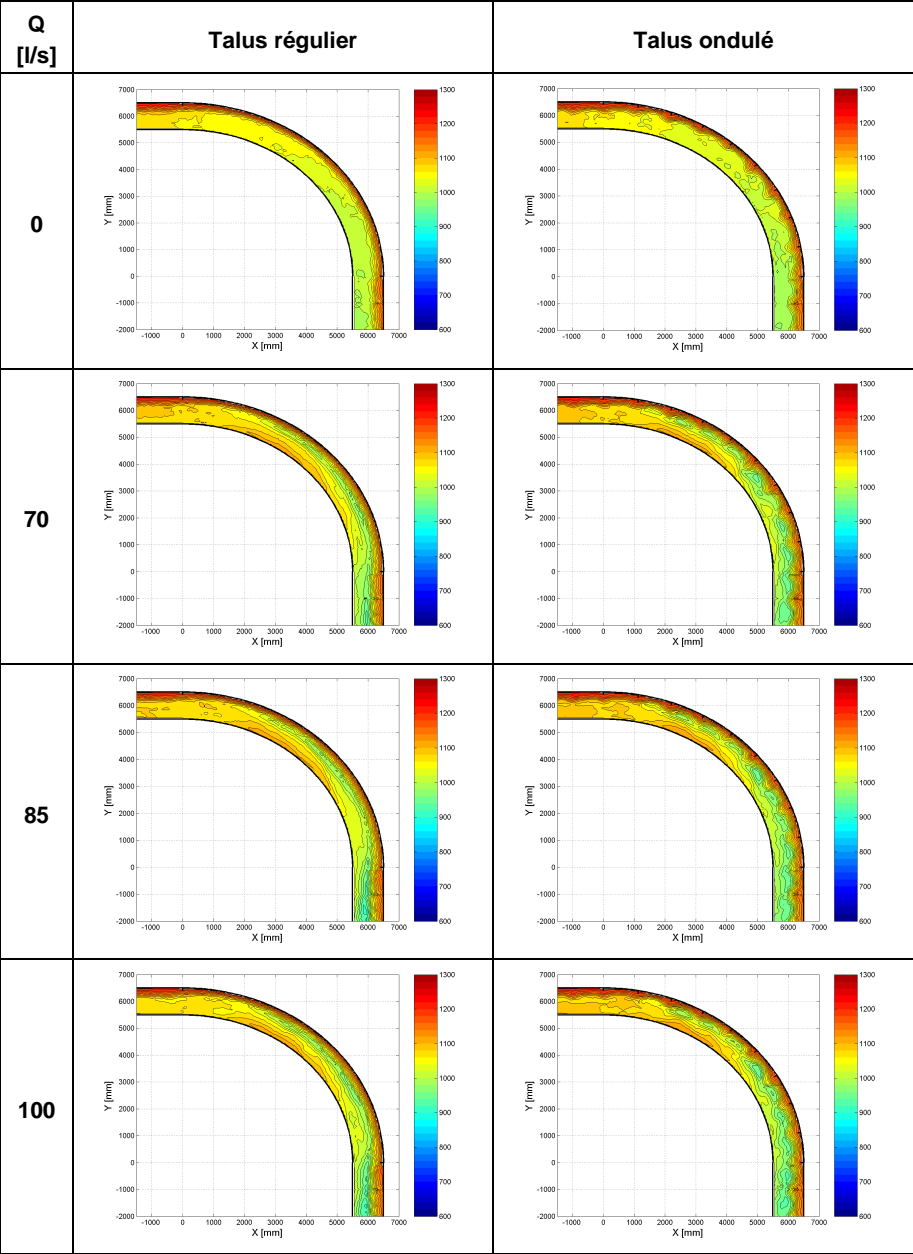


Tableau 128: Mesure de la topographie du fond (1)

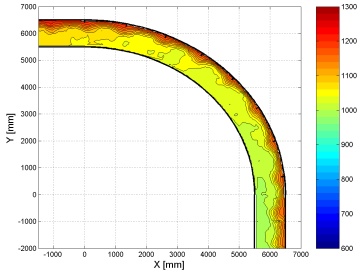
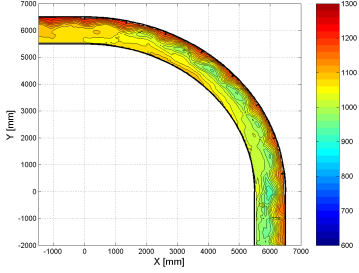
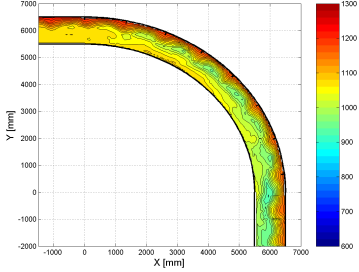
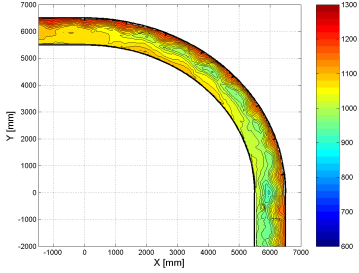
Q [l/s]	Talus ondulé modifié	
0		
70		
85		
100		

Tableau 129: Mesure de la topographie du fond (2)

Annexe A14.2: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

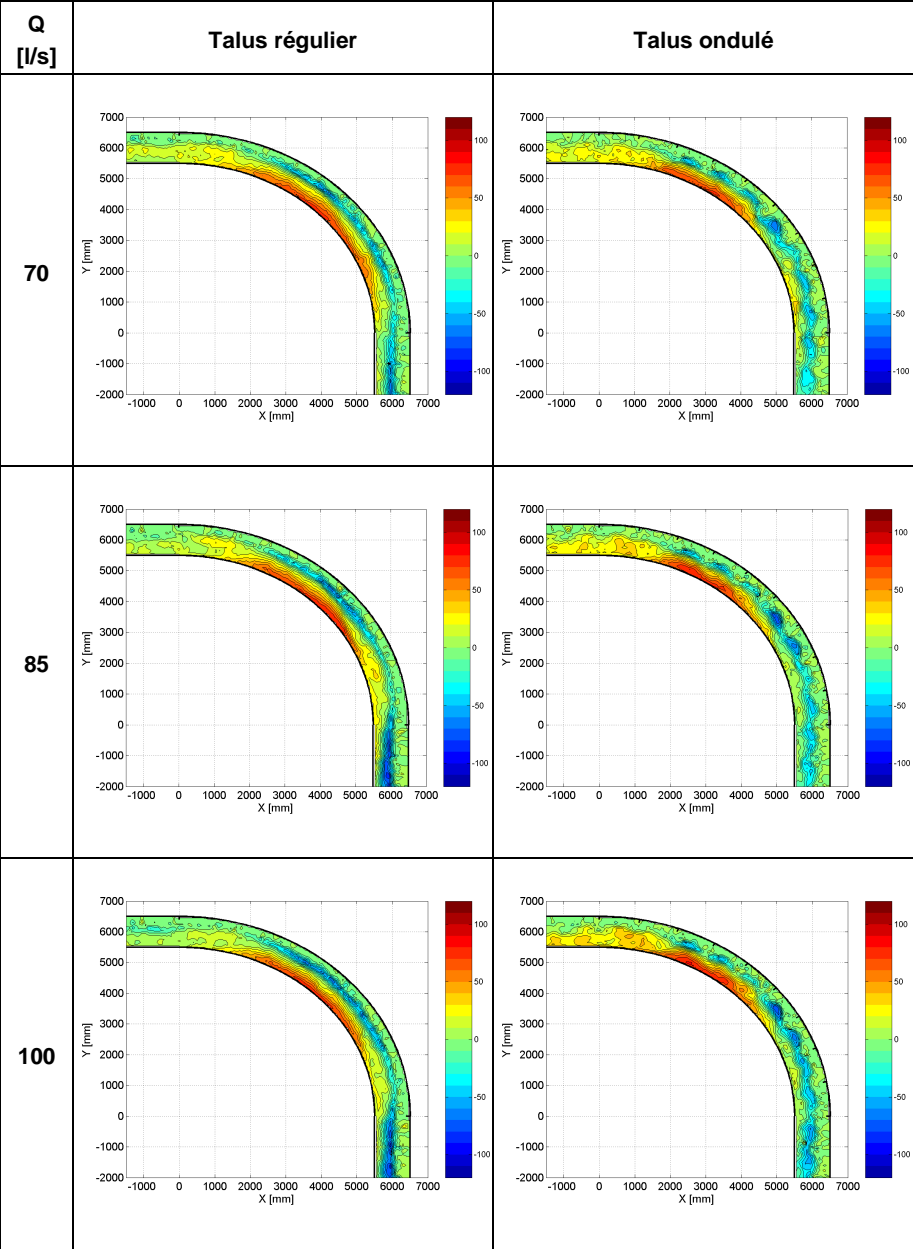


Tableau 130: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

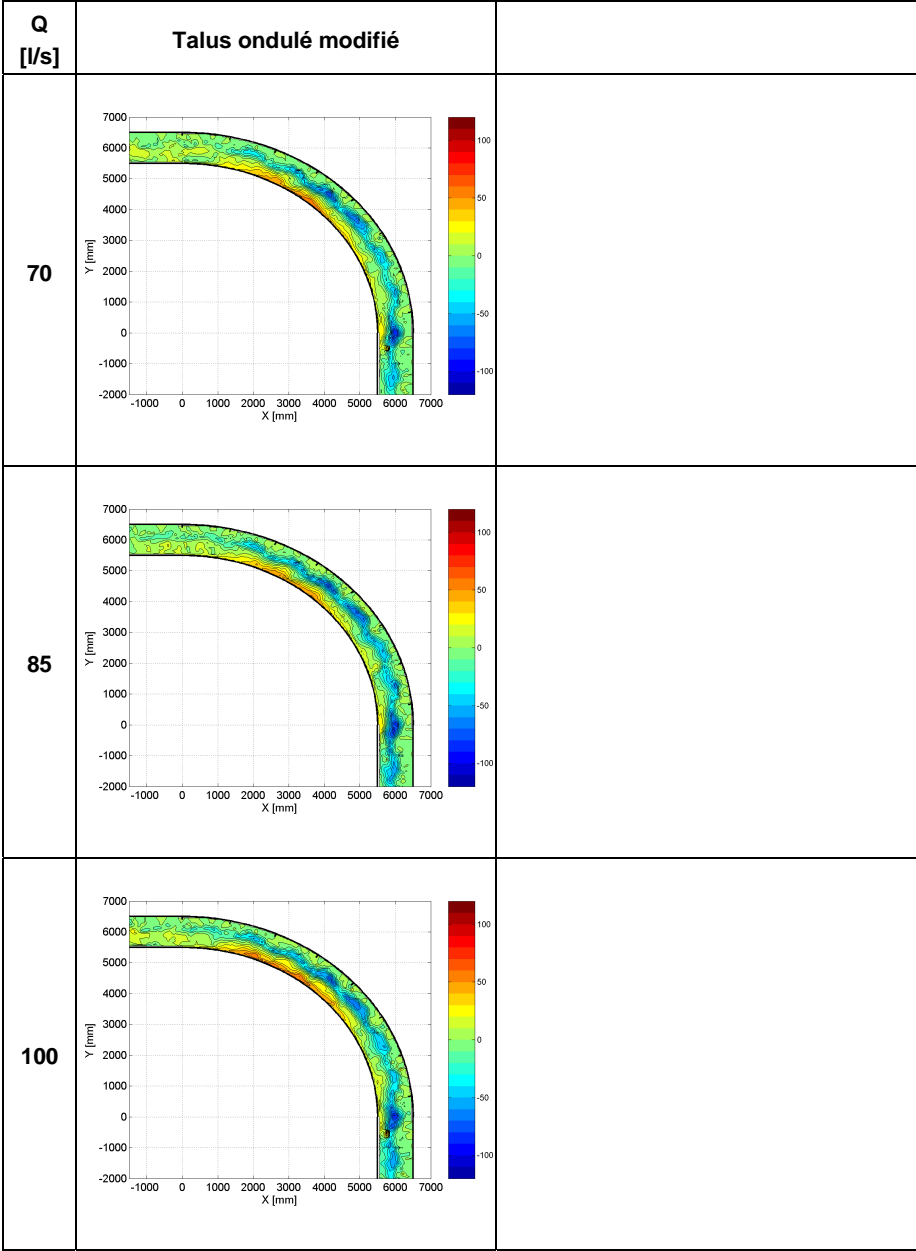


Tableau 131: Différences de niveau du fond par rapport au fond initial

Annexe A15: Dimensionnement corrigé des enrochements

Annexe A15.1: Facteur correctif de la pente longitudinale

Annexe A15.2: Facteur correctif du diamètre des blocs

Annexe A15.1: Facteur correctif de la pente longitudinale

Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 70 l/s

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al.

Avec : $(s - 1) = 1.68$

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$$\xi_s = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi_s^2 + 4} - \xi_s \right)$$

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

Q	d _B	d _B	d _B (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f	τ	η	S _m	ξ	S
[l/s]	[m]	[m]	[l]	[l]	[m]	[%]	[l]	[l]	[l]	[l]	[l]
70.0	0.0320	814	0.050	0.050	0.121	0.500	0.0067	0.1737	1.6782	0.3260	1.43
70.0	0.0640	1629	0.050	0.050	0.121	0.500	0.0043	0.0869	1.6782	0.1630	1.55

ω	$\Delta J_f = (\omega-1) J_f$
[l]	[%]
3.3	1.161
6.6	2.822

Q	d _B	d _B	d _B (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f + ΔJ_f	τ	η	S _m	ξ	S
[l/s]	[m]	[m]	[l]	[l]	[m]	[%]	[l]	[l]	[l]	[l]	[l]
70.0	0.0320	814	0.050	0.050	0.121	1.661	0.0289	0.5772	1.6782	1.0630	1.00
70.0	0.0640	1629	0.050	0.050	0.121	3.322	0.0289	0.5772	1.6782	1.0630	1.00

Tableau 132: Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 70 l/s

Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 85 l/s

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al.

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

Avec : (s - 1) = 1.68

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$$\xi_s = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi^2 + 4} - \xi \right)$$

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

Q	d _B	d _s (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f	τ	η	S _m	ξ	S
85.0	0.0320	814	0.050	0.137	0.500	0.0098	0.1962	1.6782	0.3682	1.40
85.0	0.0640	1629	0.050	0.137	0.500	0.0049	0.0981	1.6782	0.1841	1.53

ω	$\Delta J_f = (\omega-1) J_f$
2.9	0.971
5.9	2.442

Q	d _B	d _s (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f + ΔJ_f	τ	η	S _m	ξ	S
85.0	0.0320	814	0.050	0.137	1.471	0.0289	0.5772	1.6782	1.0830	1.00
85.0	0.0640	1629	0.050	0.137	2.942	0.0289	0.5772	1.6782	1.0830	1.00

Tableau 133: Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 85 l/s

Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 100 l/s

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al.

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

Avec : (s - 1) = 1.68

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$$\xi_s = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi^2 + 4 - \xi} \right)$$

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

Q	d _B	d _s (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f	τ	η	S _m	ξ	S
100.0	0.0320	814	0.050	0.152	0.500	0.0109	0.2172	1.6782	0.4075	1.37
100.0	0.0640	1629	0.050	0.152	0.500	0.0054	0.1086	1.6782	0.2037	1.52

ω	$\Delta J_f = (\omega-1) J_f$
2.7	0.829
5.3	2.158

Q	d _B	d _s (Yalin)	τ_{cor}	h	J _f + ΔJ_f	τ	η	S _m	ξ	S
100.0	0.0320	814	0.050	0.152	1.329	0.0289	0.5772	1.6782	1.0830	1.00
100.0	0.0640	1629	0.050	0.152	2.668	0.0289	0.5772	1.6782	1.0830	1.00

Tableau 134: Facteur correctif de la pente longitudinale, Q = 100 l/s

Facteur correctif du diamètre des blocs, Q = 70 l/s

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

Avec : $(s - 1) = 1.68$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi^2 + 4 - \xi} \right)$$

$$\xi = \eta \frac{s_m}{\cos \alpha}$$

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Q	Q	d _g	d _s	τ _{scr}	h	J _f	τ	γ	S _m	ξ	S
[l/s]		[m]	[m]	[s]	[m]	[%]	[s]	[-]	[-]	[-]	[-]
70.0		0.0640	1629	0.050	0.121	0.500	0.0043	0.0869	1.6782	0.1630	1.55
70.0		0.0640	1629	0.050	0.121	0.500	0.0043	0.0869	1.6782	0.1630	1.55

δ [-]	$\Delta d_B = (\delta - 1) d_B$ [m]
1.1	0.009
2.4	0.089

ω [.]	$\Delta J_f = (\omega - 1) J_f$ [%]
6.6	3.300
6.6	3.300

Q	$d_B + \Delta_B$ [m]	d_* (Vain) [μ]	τ_{cor} [μ]	h [m]	$\eta_1 + \Delta \eta_1$ [%]	τ [μ]	η [μ]	S_m [μ]	ξ [μ]	S
70.0	0.0732	1864	0.050	0.121	3.800	0.0288	0.5769	1.6782	1.0625	1.00
70.0	0.1532	3899	0.050	0.121	3.800	0.0136	0.2758	1.6782	0.5175	1.30

- 241 -

Facteur correctif du diamètre des blocs, Q = 85 l/s

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al.

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

Avec : $(s-1) = 1.68$

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$$\xi_s = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi_s^2 + 4 - \xi_s} \right)$$

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

Q [l/s]	d_B [m]	d_s (Valin) [-]	τ_{cor} [-]	h [m]	J_f [%]	τ [-]	η [-]	S_m [-]	ξ [-]	S [-]
85.0	0.0640	1629	0.050	0.137	0.500	0.0049	0.0981	1.6782	0.1841	1.53
85.0	0.0640	1629	0.050	0.137	0.500	0.0049	0.0981	1.6782	0.1841	1.53

ω [-]	$\Delta J_f = (\omega-1) J_f$ [%]
6.6	3.300
6.6	3.300

δ [-]	$\Delta d_B = (\delta-1) d_B$ [m]
1.3	0.019
2.7	0.109

Q [l/s]	$d_B + \Delta d_B$ [m]	d_s (Valin) [-]	τ_{cor} [-]	h [m]	J_f [%]	τ [-]	η [-]	S_m [-]	ξ [-]	S [-]
85.0	0.0827	2105	0.050	0.137	3.800	0.0288	0.5769	1.6782	1.0825	1.00
85.0	0.1731	4406	0.050	0.137	3.800	0.0138	0.2756	1.6782	0.5172	1.30

Tableau 136: Facteur correctif du diamètre des blocs, Q = 85 l/s

Facteur correctif du diamètre des blocs, Q = 100 l/s

Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al.

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0.77 \cdot h \cdot J}{(s-1) d_B \cdot \theta_{cr}}$$

Avec : $(s-1) = 1.68$

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

$$\xi_s = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha}$$

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi_s^2 + 4} - \xi_s \right)$$

ρ	1000	kg/m ³
ρ_s	2680	kg/m ³
g	9.81	m/s ²
ν	1.0E-6	m ² /s

Angle de talus:	α	26.6°
Angle d'équilibre:	ϕ	40.0°

Q [l/s]	d_B [m]	d_s (Valin) [-]	τ_{cor} [-]	h [m]	J_f [%]	τ [-]	η [-]	S_m [-]	ξ [-]	S [-]
100.0	0.0640	1629	0.050	0.152	0.500	0.0054	0.1086	1.6782	0.2037	1.52
100.0	0.0640	1629	0.050	0.152	0.500	0.0054	0.1086	1.6782	0.2037	1.52

ω [-]	$\Delta J_f = (\omega-1) J_f$ [%]
6.6	3.300
6.6	3.300

δ [-]	$\Delta d_B = (\delta-1) d_B$ [m]
1.4	0.028
3.0	0.128

Q [l/s]	$d_B + \Delta d_B$ [m]	d_s (Valin) [-]	τ_{cor} [-]	h [m]	J_f [%]	τ [-]	η [-]	S_m [-]	ξ [-]	S [-]
100.0	0.0915	2330	0.050	0.152	3.800	0.0288	0.5769	1.6782	1.0825	1.00
100.0	0.1918	4882	0.050	0.152	3.800	0.0136	0.2754	1.6782	0.5166	1.30

Tableau 137: Facteur correctif du diamètre des blocs, Q = 100 l/s

- | | | | |
|----|---|------|--|
| N° | 1 | 1986 | W. H. Hager
Discharge measurement structures |
| N° | 2 | 1988 | N. V. Bretz
Ressaut hydraulique forcé par seuil |
| N° | 3 | 1990 | R. Bremen
Expanding stilling basin |
| N° | 4 | 1996 | Dr R. Bremen
Ressaut hydraulique et bassins amortisseurs, aspects hydrauliques particuliers |
| N° | 5 | 1997 | Compte-rendu du séminaire à l'EPFL
Recherche dans le domaine des barrages, crues extrêmes |

- | | | | |
|----|----|------|--|
| N° | 6 | 1998 | N. Beyer Portner
Erosion des bassins versants alpins suisse par ruissellement de surface |
| N° | 7 | 1998 | G. De Cesare
Alluvionnement des retenues par courants de turbidité |
| N° | 8 | 1998 | J. Dubois
Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface |
| N° | 9 | 2000 | J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System - Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre |
| N° | 10 | 2002 | et suivants, voir verso page titre |



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, CH-1015 Lausanne
<http://lchwww.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch